



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR (RG-141536)

**EVALUASI METODE *AERIAL*
VIDEOGRAMETRI UNTUK REKONSTRUKSI
3D BANGUNAN (STUDI KASUS: CANDI
SINGASARI, JAWA TIMUR)**

YUGIE NANDA PRANATA
NRP 3512100067

DOSEN PEMBIMBING
AGUNG BUDI CAHYONO, ST, M. Sc, DEA

JURUSAN TEKNIK GEOMATIKA
Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
SURABAYA 2016

"HALAMAN INI SENGAJA DIKOSONGKAN"



TUGAS AKHIR (RG-141536)

**EVALUASI METODE *AERIAL*
VIDEOGRAMETRI UNTUK REKONSTRUKSI
3D BANGUNAN (STUDI KASUS: CANDI
SINGASARI, JAWA TIMUR)**

YUGIE NANDA PRANATA
NRP 3512100067

Dosen Pembimbing
AGUNG BUDI CAHYONO, ST, M. Sc, DEA

JURUSAN TEKNIK GEOMATIKA
Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
SURABAYA 2016

"HALAMAN INI SENGAJA DIKOSONGKAN"



FINAL ASSIGNMENT (RG-141536)

EVALUATION of 3D BUILDING RECONSTRUCTION USING AERIAL VIDEOGRAMMETRY TECHNIQUE (CASE STUDY: SINGASARI TEMPLE, EAST JAVA)

YUGIE NANDA PRANATA
NRP 3512100067

Supervisor
AGUNG BUDI CAHYONO, ST, M. Sc, DEA

GEOMATICS ENGINEERING DEPARTMENT
Faculty of Civil Engineering and Planning
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
SURABAYA 2016

"HALAMAN INI SENGAJA DIKOSONGKAN"

EVALUASI METODE *AERIAL* VIDEOGRAMETRI UNTUK REKONSTRUKSI 3D BANGUNAN (STUDI KASUS: CANDI SINGASARI, JAWA TIMUR)

Nama Mahasiswa : Yugie Nanda Pranata
NRP : 3512100067
Jurusan : Teknik Geomatika FTSP-ITS
Dosen Pembimbing : Agung Budi Cahyono, ST, M. Sc, DEA

ABSTRAK

Candi Singasari merupakan salah satu situs warisan dunia dimana upaya untuk konservasi, inventarisasi, dan dokumentasi cagar budaya tersebut diperlukan. Sebagai langkah awal yang dapat dilakukan dalam upaya dokumentasi cagar budaya adalah membentuk model rekonstruksi 3D Candi Singasari. Adapun teknologi yang ditawarkan dalam pemodelan rekonstruksi 3D bangunan begitu bervariasi dengan kelebihan dan kelemahan masing-masing seperti teknologi LiDAR, *laser scanner*, dan fotogrametri jarak dekat. Dewasa ini, perkembangan dalam dunia fotogrametri untuk kegiatan pemodelan 3D begitu pesat hingga adanya metode yang berkembang saat ini yaitu metode videogrametri. Penelitian ini menggunakan teknologi videogrametri dan metode SfM untuk membentuk rekonstruksi 3D Candi Singasari. Teknologi videogrametri memiliki kelebihan seperti akuisisi data yang sederhana, harga ekonomis, minim perubahan fotogrametri dalam gambar, dan *daya overlap* tinggi dari data yang dihasilkan. Kriteria yang digunakan dalam rekonstruksi 3D Candi Singasari menggunakan klasifikasi *Level of Detail* (LoD). Pada penelitian ini difokuskan pada dua aspek yaitu aspek evaluasi visual rekonstruksi 3D dan perhitungan nilai ketelitian geometrik struktur Candi

Singasari. Hasil evaluasi visual rekonstruksi 3D diperoleh bentuk *point cloud* sejumlah 308.248 titik, *dense cloud* sejumlah 1.126.457 titik, dan *textured* yang meliputi 225.291 titik (permukaan/face) dan 113.595 *vertex* dari 161 frame video dengan rata-rata deteksi fitur tiap frame video sejumlah 2.242 titik yang diolah menggunakan metode *structure from motion* (SfM). Sedangkan evaluasi untuk validasi nilai geometrik struktur Candi Singasari diperoleh dari hasil korelasi dan uji standar kesalahan. Hasil korelasi antara variabel ICP ukuran model rekonstruksi 3D terhadap ukuran di lapangan menunjukkan nilai korelasi untuk koordinat *easting* sebesar 0.998, koordinat *northing* sebesar 0.997, dan koordinat Z 0.998. Adapun untuk nilai uji standar kesalahan untuk koordinat *easting* diterima sebesar 83%, koordinat *northing* diterima sebesar 91.7%, dan koordinat Z diterima sebesar 91.7% juga nilai RMSE koordinat *easting* sebesar 0.177 meter, *northing* sebesar 0.194 meter, dan Z sebesar 0.168 meter.

Kata Kunci: Candi Singasari, Metode Videogrametri, LoD, dan SfM.

**Evaluation of 3D Building Reconstruction Using Aerial
Videogrammetry Technique
(Case Study: Singasari Temple, East Java)**

Name : Yugie Nanda Pranata
NRP : 3512100067
Department : Geomatics Engineering FTSP-ITS
Supervisor : Agung Budi Cahyono, ST, M. Sc, DEA

ABSTRACT

Singasari Temple is one of the world heritage site where efforts for conservation, inventory, and documentation of cultural heritage needed. As a first step to do is to form a 3D model of reconstruction for the Singasari Temple. The technology offered in the modelling of a 3D building reconstruction is so varied with the advantage and disadvantage of each technology such as LiDAR, Laser Scanner, and close range photogrammetry. Now, photogrammetry technique developments for 3D modelling activity so fast in the world that their methods were developed at this time such a videogrammetry method. This studyresearch uses videogrammetry method and SfM (Structure from Motion) for 3D building reconstruction of the Singasari Temple. Videogrammetry method has advantages such as simply of data acquisition, economical price, minimum photometric change in the image, and the generated power of high overlap data. Criteria used for Singasari 3D reconstruction use level of detail (LOD) classification. In this study focused on two aspects, visual evaluation of 3D

reconstruction and value calculation of the geometric accuracy of Singasari Temple structure. The result of visual evaluation of 3D reconstruction is obtained the point cloud a number of 308,248 points, dense point cloud number 1,126,457 points, and the textured cover 225,291 points (surface), and 113,595,161 vertex of video frames with the average detection feature each video frame number 2,242 points whichs is processed using method of structure from motion (SfM). While the evaluation for validation of the geometric value structure of Singasari Temple is obtained from the correlation between two variables and standard test error. The correlation between the variable ICP 3D reconstruction model size to the size of the field shows the correlation value for 0.998 amounted to easting coordinate, northing coordinate of 0.997, and Z coordinate of 0.998. as for the value of standard test for easting coordinate error accepted by 83%, northing coordinate 91.7%, and Z coordinates 91.7% and RMSE value for easting coordinate 0.177 meters, northing coordinate 0.194 meter, and Z coordinate 0.168 meters.

Keyword: Singasari Temple, Videogrammetry Method, LoD, and SfM

**EVALUASI METODE *AERIAL* VIDEOGRAMETRI
UNTUK REKONSTRUKSI 3D BANGUNAN
(STUDI KASUS: CANDI SINGASARI, JAWA TIMUR)**

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada
Jurusan S-1 Teknik Geomatika
Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

**YUGIE NANDA PRANATA
NRP. 3512100067**

Disetujui oleh Pembimbing Tugas Akhir:

Agung Budi Cahyono, ST, M. Sc, DEA
NIP. 19690520 199903 1002



SURABAYA, JULI 2016

"HALAMAN INI SENGAJA DIKOSONGKAN"

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, puji syukur ke hadirat Allah SWT, karena atas segala karunia dan kasih-NYA kepada penulis, sehingga penulis dapat menyelesaikan penelitian dalam Tugas Akhirnya yang berjudul **“EVALUASI METODE AERIAL VIDEOGRAMETRI UNTUK REKONSTRUKSI 3D BANGUNAN (STUDI KASUS: CANDI SINGASARI, JAWA TIMUR)”** sesuai dengan waktu yang ditentukan.

Pada kesempatan ini penulis hendak menyampaikan ucapan terima kasih kepada seluruh pihak yang telah memberikan bantuan dan dukungan dalam penyelesaian Tugas Akhir ini. Ucapan terima kasih ini penulis tunjukkan kepada:

1. Kedua orang tua dan keluarga di rumah yang selama ini selalu memberikan dukungan, semangat, dan doa.
2. Bapak Mokhamad Nur Cahyadi, ST, M.Sc, Ph.D selaku Ketua Jurusan Teknik Geomatika FTSP - ITS.
3. Bapak Agung Budi Cahyono, ST, M.Sc, DEA selaku dosen pembimbing yang selalu sabar dalam membimbing penulis.
4. Bapak - Ibu Dosen dan Karyawan Teknik Geomatika FTSP-ITS.
5. Rekan-rekan PVIA-ITS yang membantu selama proses pengambilan hingga pengolahan data.
6. Balai Pelestarian Cagar Budaya Mojokerto yang telah memberi ijin untuk melakukan penelitian di area Candi Singosari.
7. Teman – teman angkatan 2012 yang telah banyak membantu penulis, khususnya dalam penulisan Tugas Akhir ini.

8. Keluarga besar HIMAGE – ITS G13, G14, G15, dan G16.
9. Dan banyak lagi pihak – pihak yang tidak bisa penulis sebutkan satu persatu, penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar – besarnya.

Penulis menyadari segala keterbatasan yang dimiliki, tentunya Tugas Akhir ini masih jauh dari sempurna. Oleh karena itu, penulis mengharapkan saran dan kritik yang membangun untuk pengembangan selanjutnya. Harapan penulis atas Tugas Akhir ini adalah semoga dapat memberikan manfaat bagi semua pihak dan dapat diterima sebagai sumbangan pemikiran dalam pengembangan ilmu pengetahuan.

Surabaya, Juli 2016

Penulis

DAFTAR ISI

ABSTRAK	i
<i>ABSTRACT</i>	iii
KATA PENGANTAR	vii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR TABEL	xv
DAFTAR RUMUS	xvii
DAFTAR LAMPIRAN	xix
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang Masalah	1
1.2 Rumusan Permasalahan	3
1.3 Batasan Masalah	3
1.4 Tujuan Penelitian	4
1.5 Manfaat Penelitian	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Candi Singasari	5
2.2 Survei Videogrametri	5
2.2.1 Videogrametri dan Fotogrametri	6
2.2.2 Prinsip Dasar Videogrametri dan Fotogrametri	7
2.2.3 Reseksi Spasial (<i>Space Resection</i>)	9
2.2.4 Interseksi Spasial (<i>Space Intersection</i>)	11
2.3 Sistem Koordinat dalam Videogrametri	12
2.3.1 Sistem Koordinat Foto	12
2.3.2 Sistem Koordinat Piksel	13
2.3.3 Sistem Koordinat Kamera	13
2.3.4 Sistem Koordinat Objek 3D	13
2.4 Kalibrasi Kamera	14
2.5 Kualitas Rekonstruksi 3D Bangunan	18
2.5.1 <i>Structure From Motion</i> (SfM)	18
2.5.2 <i>Level of Detail</i> (LOD)	21

2.5.3	Distribusi Titik Kontrol dan Titik Ikat	26
2.5.4	Ketelitian Geometrik Rekonstruksi 3D Bangunan	23
2.6	<i>Unmanned AERIAL Vehicle (UAV)</i>	26
2.7	Resensi Penelitian Terdahulu.....	30
2.7.1	<i>Building Reconstruction from Terrestrial Video Sequences</i>	30
2.7.2	<i>Progressive 3D Reconstruction of Infrastructure with Videogrammetry</i>	31
2.7.3	<i>Videogrammetric Technique for Three- Dimensional Structural Progressive Collapse Measurement</i>	32
BAB III METODOLOGI PENELITIAN		33
3.1	Lokasi Penelitian	33
3.2	Data dan Peralatan	34
3.2.1	Data.....	34
3.2.2	Peralatan.....	34
3.3	Metodologi Penelitian.....	35
3.3.1	Tahap Kalibrasi Kamera	35
3.3.2	Tahap Pengolahan Data	38
3.3.3	Tahap Akhir	40
BAB IV HASIL DAN ANALISA		41
4.1	Hasil Pengolahan Data.....	41
4.1.1	Perhitungan Kerangka Dasar	41
4.1.2	Perhitungan GCP dan ICP	42
4.1.3	Kalibrasi Kamera	45
4.1.4	Pemodelan Rekonstruksi 3D.....	45
4.1.5	Koordinat ICP Pemodelan 3D	49
4.2	Analisa	50
4.2.1	Kerangka Dasar.....	50
4.2.2	Kalibrasi Kamera	51
4.2.3	Bentuk Pemodelan Rekonstruksi 3D	52

4.2.4 Koordinat ICP	54
BAB V PENUTUP	59
5.1 Kesimpulan	59
5.2 Saran	60

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

BIODATA PENULIS

"HALAMAN INI SENGAJA DIKOSONGKAN"

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Candi Singasari.....	5
Gambar 2.2	Kondisi Kesegaran.....	7
Gambar 2.3	Interseksi Spasial.....	12
Gambar 2.4	Sistem Koordinat Foto dan Sistem Koordinat Piksel	13
Gambar 2.5	Tipe Kalibrasi Kamera	17
Gambar 2.6	Bidang Kalibrasi Kamera	17
Gambar 2.7	Teknik <i>Structure from Motion</i>	18
Gambar 2.8	<i>SIFT Feature Detection</i>	19
Gambar 2.9	<i>Stereo</i> Videogrametri	20
Gambar 2.10	Survei Videogrametri	21
Gambar 2.11	<i>Level of Detail</i>	23
Gambar 2.12	Pengikatan ke Muka	28
Gambar 2.13	Akurasi (a) dan Presisi (b).....	23
Gambar 3.1	Lokasi Penelitian	33
Gambar 3.2	Struktur Candi Singasari	33
Gambar 3.3	Proses Kalibrasi Kamera	36
Gambar 3.4	Proses Pengolahan Data	38
Gambar 4.1	Kerangka Dasar Pengukuran	42
Gambar 4.2	Persebaran GCP dan ICP Tampak Depan	44
Gambar 4.3	Persebaran GCP dan ICP Tampak Belakang	44
Gambar 4.4	Posisi Pengambilan Frame Video.....	46
Gambar 4.5	Model 3D Tampak Depan	46
Gambar 4.6	Model 3D Tampak Belakang	47
Gambar 4.7	Model 3D Tampak Depan Samping Kanan.....	47
Gambar 4.8	Model 3D Tampak Depan Samping Kiri.....	48
Gambar 4.9	Model 3D Tampak Atas	48
Gambar 4.10	Fitur Deteksi Frame Video	53

"HALAMAN INI SENGAJA DIKOSONGKAN"

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Syarat Orde LOD	22
Tabel 2.2 Pengelompokan Metode Penentuan Posisi dengan GPS	27
Tabel 2.3 Faktor Pengali Uji Standar Kesalahan	25
Tabel 2.4 Fitur Pengukuran <i>Aerial</i> , Jarak Dekat, UAV	29
Tabel 2.5 Spesifikasi Sensor Kamera UAV	30
Tabel 4.1 Koordinat Titik Poligon dalam Sistem Koordinat UTM	41
Tabel 4.2 Koordinat GCP dan ICP Struktur Candi Singasari	43
Tabel 4.3 Hasil Kalibrasi Kamera	45
Tabel 4.4 Koordinat ICP Pemodelan Rekonstruksi 3D.....	49
Tabel 4.5 Kesalahan Kerangka Dasar	51
Tabel 4.6 Hasil Model 3D.....	52
Tabel 4.7 Nilai Kesalahan ICP	54
Tabel 4.8 Nilai RMSE ICP.....	55
Tabel 4.9 Uji Standar Kesalahan.....	56

"HALAMAN INI SENGAJA DIKOSONGKAN"

DAFTAR RUMUS

Rumus 2.1 Persamaan Kolinieraritas	8
Rumus 2.2 Matriks Rotasi Persamaan Kolinieraritas.....	9
Rumus 2.3 Linierisasi Proses Reseksi Spasial	10
Rumus 2.4 Matriks Reseksi Spasial	11
Rumus 2.5 Transformasi Koordinat Konform 3D.....	14
Rumus 2.6 Matriks Rotasi Konform 3D	14
Rumus 2.7 Polinomial Distorsi Radial.....	15
Rumus 2.8 Polinomial Pergeseran Distorsi x dan y	15
Rumus 2.9 <i>Root Mean Square Error</i>	24
Rumus 2.10 Standar Deviasi	24
Rumus 2.11 Korelasi <i>Pearson</i>	25

"HALAMAN INI SENGAJA DIKOSONGKAN"

DAFTAR LAMPIRAN

- Lampiran 1 Perekaman Struktur Candi Singasari
- Lampiran 2 Pemotongan Frame Video
- Lampiran 3 Grafik Korelasi ICP
- Lampiran 4 Perhitungan Uji Standar Kesalahan
- Lampiran 5 Surat Ijin Pengambilan Data

"HALAMAN INI SENGAJA DIKOSONGKAN"

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Pesona panorama Candi Singasari di Jawa Timur telah dikenal luas di dalam negeri maupun luar negeri sebagai situs sejarah warisan dunia. Hal ini menunjukkan bahwa Candi Singasari di Jawa Timur merupakan salah satu kekayaan arsitektur nusantara yang mempunyai karakter lokal sebagai bangunan pada masa Kerajaan Singasari di abad ke-13 (Sayekti, et al., 2014). Banyak penelitian yang telah dilakukan terhadap candi, tetapi lebih menyoroti pada tafsir-tafsir historis. Oleh karena itu, diperlukan penelitian yang bersifat fundamental sebagai langkah inventarisasi dan dokumentasi yang terdapat pada relief Candi Singasari sebagai upaya konservasi cagar budaya di Indonesia.

Seiring dengan perkembangan zaman, konstruksi asli bangunan Candi Singasari mengalami kerusakan karena faktor usia, iklim, cuaca, bencana alam dsb. Sehingga, upaya dokumentasi Candi Singasari sangat diperlukan untuk mendukung kegiatan konservasi cagar budaya di Indonesia. Langkah yang tepat untuk mewujudkan dokumentasi bangunan Candi Singasari agar mendekati bentuk aslinya adalah dengan rekonstruksi 3D.

Rekonstruksi 3D adalah proses merekam bentuk suatu objek sekaligus membentuk struktur objek tersebut. Bentuk objek diinterpretasikan dalam koordinat spasial (titik-titik objek) yang diperoleh secara langsung (sensor aktif) maupun tidak langsung (sensor pasif) sehingga luaran akhir dari proses ini berupa visualisasi 3D. Untuk keperluan praktis, hasil dari rekonstruksi 3D digunakan dalam arsitektur dan teknik sipil untuk mendesain rancangan rekonstruksi bangunan (Stone & Cheok, 2001).

Saat ini, rekonstruksi 3D umumnya menggunakan teknologi seperti laser *scanning* dan fotogrametri jarak dekat. Laser *scanning* adalah sistem memindai objek menggunakan teknologi laser yang dilakukan secara *terrestrial* agar memperoleh visualisasi 3D dengan akurasi tinggi untuk keperluan rekayasa atau penerapan ilmu teknik (Caldas, et al., 2004). Visualisasi 3D dengan akurasi tinggi dari sebuah objek diperoleh menggunakan teknologi LiDAR (*Light Detection and Ranging*). Namun, penggunaan LiDAR untuk kasus objek spasial yang bersifat sempit, data yang diperoleh tidak akurat disebabkan karena *pixel* visualisasinya yang tercampur (Gordon, et al., 2003). Selain itu, pengguna (*scanners*) untuk proyek pemetaan rekonstruksi bangunan terkendala biaya yang relatif mahal, bahkan titik kontrol saat pengambilan data LiDAR harus diatur terlebih dahulu agar *point cloud* yang diperoleh saling terhubung (Hajian & Gerber, 2010). Metode lain untuk rekonstruksi 3D adalah teknologi fotogrametri jarak dekat (*close range photogrammetry*) yang merupakan teknik pengukuran objek (2D atau 3D) dari hasil visualisasi data, seperti fotografi (foto), citra, kamera CCD, dan sensor radiasi (Mikhail, et al., 2001). Agar membentuk visualisasi objek 3D maka pengguna (*photogrammetry engineer*) harus mengambil banyak foto dari berbagai sisi dan sudut objek secara *manual* sekaligus menggabungkannya untuk memperoleh visualisasi objek 3D tersebut. Sehingga, untuk memperoleh pendekatan kualitas resolusi dari hasil visualisasi 3D yang baik membutuhkan waktu pengumpulan data yang lama serta keahlian *photogrammetry engineer* selama proses pengolahan data spasial berlangsung (Rashidi, 2013).

Dewasa ini, *aerial* videogrametri (metode videogrametri) digunakan untuk memperoleh data spasial menggunakan seperangkat kamera terkalibrasi atau mendekati kamera metrik. Selain itu, metode ini sangat menjanjikan untuk mengatasi kelemahan-kelemahan dari metode yang sudah ada sebelumnya

sehingga penerapan *aerial* videogrametri diharapkan efektif untuk pengumpulan rekonstruksi data spasial (Rashidi, 2014). Penelitian ini akan membahas kesesuaian *aerial* videogrametri untuk studi ketelitian geometrik rekonstruksi 3D berdasarkan hasil rekaman video struktur Candi Singasari dan membuat visualisasi 3D bangunan Candi Singasari sebagai wujud nyata konservasi cagar budaya di Indonesia.

1.2 Rumusan Permasalahan

Berdasarkan latar belakang di atas, rumusan masalah dalam penelitian ini adalah:

1. Bagaimana bentuk visualisasi rekonstruksi 3D Candi Singasari menggunakan *aerial* videogrametri?
2. Bagaimana nilai ketelitian geometrik rekonstruksi 3D Candi Singasari menggunakan metode *aerial* videogrametri terhadap ukuran titik GCP (*Ground Control Point*) dan ICP (*Independent Check Point*) yang diperoleh dari hasil pengukuran langsung (*terrestrial*) di lapangan?

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Penelitian ini menggunakan metode *aerial* videogrametri untuk rekonstruksi 3D Candi Singasari dengan spesifikasi maksimal detil tingkat 3 (LOD3) dan mode perekaman video menggunakan mode FHD: 1920x1080p.
2. Teknologi yang digunakan dalam penelitian ini adalah kamera digital, UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*) jenis *quadcopter*, GPS Geodetik, dan *Total Station*.
3. Perhitungan nilai ketelitian geometrik struktur Candi Singasari dievaluasi terhadap titik *Ground Control Point* (GCP) dan *Independent Check Point* (ICP) yang diperoleh dari hasil pengukuran langsung (*terrestrial*) di lapangan.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan yang akan dicapai dalam penelitian ini, yaitu:

1. Mengevaluasi bentuk visualisasi rekonstruksi 3D Candi Singasari menggunakan *aerial* videogrametri.
2. Menghitung nilai ketelitian geometrik struktur Candi Singasari dievaluasi terhadap titik *Ground Control Point* (GCP) dan *Independent Check Point* (ICP) yang diperoleh dari hasil pengukuran langsung (*terrestrial*) di lapangan.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat yang ingin diperoleh dalam penelitian ini, yaitu:

1. Data dan hasil penelitian dapat memberikan pengetahuan mengenai penggunaan metode *aerial* videogrametri untuk rekonstruksi 3D Candi Singasari.
2. Informasi tentang visualisasi 3D dan nilai ketelitian geometrik untuk rekonstruksi 3D Candi Singasari dapat digunakan sebagai referensi untuk pemugaran bangunan candi sebagai upaya konservasi cagar budaya di Indonesia.
3. Hasil evaluasi metode *aerial* videogrametri terhadap titik GCP (*Ground Control Point*) dan ICP (*Independent Check Point*) dari pengukuran langsung (*terrestrial*) di lapangan untuk rekonstruksi 3D Candi Singasari dapat digunakan sebagai referensi untuk pemilihan metode yang tepat guna di masa yang akan datang.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Candi Singasari

Indonesia mempunyai ratusan candi yang menyebar di seluruh wilayah dengan bentuk arsitektur yang unik dan beragam. Karya arsitektur ini dipengaruhi oleh seni bangunan dari kuil India, tetapi pada perkembangan lebih lanjut mengalami proses adaptasi sehingga cenderung menyimpang dari kitab bangunan kuno India. Hal ini membuktikan bahwa pengaruh budaya lokal mengadaptasi candi sehingga desain candi di Indonesia menguat dengan kekhasannya sendiri (Rahardian, 2008). Tipologi candi di nusantara secara umum dibagi menjadi dua yaitu gaya Jawa Tengah dan Jawa Timur. Penggolongan candi gaya Jawa Tengah dan Jawa Timur sebenarnya untuk mempermudah mengenali secara *general* karakteristik bentuk-bentuk candi yang menunjukkan perbedaan salah satunya Candi Singasari di Jawa Timur yang menjadi objek penelitian ini.



Gambar 2.1 Candi Singasari (Survei, 2015)

2.2 Survei Videogrametri

Konsep dalam metode videogrametri pada dasarnya sama dengan metode fotogrametri. Konsep utamanya adalah penentuan posisi dengan metode triangulasi (interseksi) menggunakan minimal foto dari dua eksposur yang berbeda dengan terlebih dahulu mengetahui posisi dan orientasi sensor

yang digunakan yang diperoleh dari proses reseksi (Hidayatullah, 2012).

2.2.1 Videogrametri dan Fotogrametri

Fotogrametri merupakan suatu seni, pengetahuan, dan teknologi untuk memperoleh informasi yang dapat dipercaya tentang suatu objek fisik dan keadaan di sekitarnya melalui proses perekaman, pengamatan atau pengukuran, dan interpretasi citra fotografis atau rekaman visualisasi gelombang elektromagnetik (Hidayatullah, 2012).

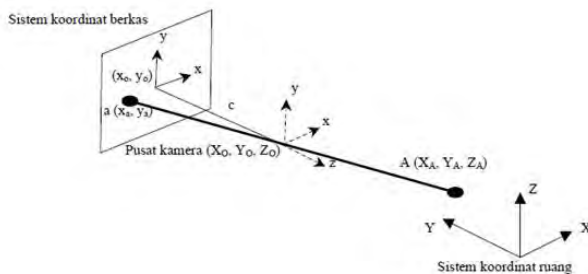
Objek fisik berupa citra foto diperoleh melalui proses perekaman dengan kamera baik dengan wahana terbang (*aerial*) maupun secara terestris (fotogrametri rentang dekat). Kamera yang digunakan untuk keperluan fotogrametri disebut kamera metrik yaitu kamera yang didesain untuk keperluan fotogrametri, mempunyai stabilitas parameter *internal*, mempunyai mekanisme lensa yang hampir sempurna, sehingga kesalahan distorsi dari foto yang dihasilkan sangat kecil. Selain kamera metrik, ada jenis kamera yang disebut kamera non-metrik yang desain awalnya tidak untuk keperluan fotogrametri, sehingga pengukuran pada foto non-metrik masih terdapat distorsi. Videogrametri sendiri menggunakan prinsip yang sama dengan fotogrametri, hanya saja perekaman data dilakukan dengan menggunakan kamera video (Hidayatullah, 2012). Pada penelitian ini, proses perekaman berupa video menggunakan kamera non-metrik yang terpasang pada wahana terbang (*aerial*) untuk memperoleh jangkauan visualisasi yang luas (*aerial* videogrametri).

Saat ini, fotogrametri berbasis kamera video (atau disebut juga videogrametri) telah mendapat banyak perhatian dikarenakan perkembangan sensor video

resolusi tingginya yang dapat merekam berjuta piksel dalam sebuah pemotongan. Selain itu, karena frame video yang berurutan, informasi dari setiap frame video disusun berdasarkan pemotongan sebelumnya. Oleh karena itu, permukaan 3D pada video dapat direkonstruksi secara progresif (Brilakis, et al., 2011).

2.2.2 Prinsip Dasar Videogrametri dan Fotogrametri

Pada saat sebuah foto dan video diambil melalui proses perekaman, berkas sinar dari objek akan menjalar menyerupai garis lurus menuju pusat lensa kamera hingga mencapai bidang film. Kondisi dimana titik objek pada dunia nyata, titik proyeksi, dan titik objek pada bidang foto terletak satu garis dalam ruang dinamakan kondisi kesegarisan berkas sinar atau kondisi kolinearitas (*collinearity condition*). Kondisi ini merupakan syarat fundamental dalam fotogrametri (Atkinson, 1996).



Gambar 2.2 Kondisi Kesegarisan (Atkinson, 1996)

Berdasarkan metode fotogrametri, posisi dari sebuah objek pada ruang didefinisikan pada sistem koordinat kartesian 3D (X , Y , Z). Pada awalnya objek terdefinisi pada sistem koordinat berkas. Kemudian dilakukan transformasi koordinat untuk

mendapatkan koordinat objek pada sistem koordinat tanah. Antara kedua sistem koordinat itu terdapat perbedaan orientasi dan skala sehingga transformasi koordinat terdiri dari translasi, rotasi, dan perubahan skala.

Pusat dari sistem koordinat berkas merupakan pusat dari lensa kamera yang dikenal dengan nama pusat perspektif (*perspective center*). Titik pusat lensa kamera diketahui, sehingga berkas sinar dari objek yang melewati pusat lensa kamera akan jatuh pada sebuah titik pada bidang foto yang dapat diketahui koordinat fotonya. Pada gambar 2.1, X_o, Y_o, Z_o adalah titik pusat kamera, $x_a, y_a, -c$ adalah koordinat sebuah titik A pada sistem koordinat berkas, dan X_A, Y_A, Z_A adalah koordinat titik A pada sistem koordinat tanah, sehingga persamaan kolinieraritasnya (Atkinson, 1996):

$$\begin{aligned} x_a &= -c \frac{[r_{11}(X_o - X_A) + r_{12}(Y_o - Y_A) + r_{13}(Z_o - Z_A)]}{[r_{31}(X_o - X_A) + r_{32}(Y_o - Y_A) + r_{33}(Z_o - Z_A)]} \\ y_a &= -c \frac{[r_{21}(X_o - X_A) + r_{22}(Y_o - Y_A) + r_{23}(Z_o - Z_A)]}{[r_{31}(X_o - X_A) + r_{32}(Y_o - Y_A) + r_{33}(Z_o - Z_A)]} \end{aligned} \quad (2.1)$$

dengan c merupakan *principal distance*, dan r_{ij} merupakan elemen dari matriks rotasi. Rumus di atas merupakan rumus kolinieraritas dengan elemen dan matriks rotasi diberikan pada persamaan berikut:

$$R = R_{\omega} R_{\varphi} R_{\kappa} =$$

$$\begin{bmatrix} \cos \varphi \cos \kappa & \sin \omega \sin \varphi \cos \kappa + \cos \omega \sin \kappa & -\cos \omega \sin \varphi \cos \kappa + \sin \omega \sin \kappa \\ -\cos \varphi \sin \kappa & -\sin \omega \sin \varphi \sin \kappa + \cos \omega \cos \kappa & \cos \omega \sin \varphi \sin \kappa + \sin \omega \cos \kappa \\ \sin \varphi & -\sin \omega \cos \varphi & \cos \omega \cos \varphi \end{bmatrix}$$

(2.2)

R_{κ} merupakan rotasi terhadap sumbu z, R_{ω} adalah rotasi terhadap sumbu x, sedangkan R_{φ} rotasi terhadap sumbu y. Rumus di atas membutuhkan nilai – nilai yang didapat dari proses reseksi spasial.

2.2.3 Reseksi Spasial (*Space Resection*)

Space Resection atau reseksi spasial dengan kolinieritas merupakan metode numerik murni yang secara serentak menghasilkan enam unsur orientasi luar (EOP). Biasanya nilai sudut XL, YL, ZL, ω , φ , κ diperoleh dengan penyelesaian itu. *Space Resection* dengan kolinieritas memungkinkan penggunaan ulang sejumlah titik kontrol medan, sehingga dapat digunakan cara perhitungan kuadrat terkecil untuk menentukan nilai yang paling mungkin bagi keenam unsur itu. Meskipun perhitungannya panjang dapat dilakukan secara rutin. *Space Resection* dengan kolinieritas merupakan metode yang lebih disukai untuk menentukan orientasi luar (Wolf & Dewitt, 2000).

Space Resection merupakan suatu proses untuk menentukan elemen *Exterior Orientation Parameter* dan posisi sensor dari titik kontrol tanah dan koordinat *image*. Metode perhitungan yang paling biasa digunakan adalah persamaan kolinieritas, dimana prinsip dari persamaan tersebut adalah titik kontrol, titik pada *image*, dan proyeksi pusat terletak pada satu garis

lurus. Untuk setiap titik kontrol, dapat diperoleh dua persamaan. Karena terdapat 6 *parameter* EO, sedikitnya tiga titik kontrol dibutuhkan untuk memecahkan masalah *resection*. Metode perhitungan dengan menggunakan teknik *Least Square* akan diterapkan pada penelitian ini untuk menentukan nilai yang paling mungkin pada enam *parameter* EO.

Dalam penyelesaian secara *least square* maka diperoleh persamaan untuk proses *resection* dalam bentuk persamaan kolinieritas terlinierisasi yang disederhanakan termasuk untuk nilai residualnya sebagai berikut (Wolf & Dewitt, 2000):

$$\begin{aligned} b_{11}d\omega + b_{12}d\varphi + b_{13}d\kappa - b_{14}dX_L - b_{15}dY_L - b_{16}dZ_L \\ = J + vx_a \\ b_{21}d\omega + b_{22}d\varphi + b_{23}d\kappa - b_{24}dX_L - b_{25}dY_L - b_{26}dZ_L \\ = K + vy_a \end{aligned} \quad (2.3)$$

dX_L , dY_L , dZ_L , $d\omega$, $d\varphi$ adalah *parameter* unsur orientasi luar yang didapat dari proses reseksi spasial dimana setiap notasi di atas diwakili oleh susunan matriks sebagai berikut :

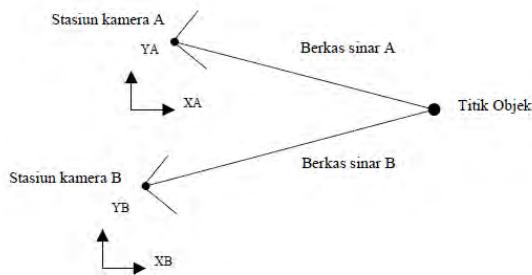
$$\begin{aligned}
 A &= \begin{bmatrix} b_{11a} & b_{12a} & b_{13a} & -b_{14a} & -b_{15a} & -b_{16a} \\ b_{21a} & b_{22a} & b_{23a} & -b_{24a} & -b_{25a} & -b_{26a} \\ b_{11b} & b_{12b} & b_{13b} & -b_{14b} & -b_{15b} & -b_{16b} \\ b_{21b} & b_{22b} & b_{23b} & -b_{24b} & -b_{25b} & -b_{26b} \\ b_{11c} & b_{12c} & b_{13c} & -b_{14c} & -b_{15c} & -b_{16c} \\ b_{21c} & b_{22c} & b_{23c} & -b_{24c} & -b_{25c} & -b_{26c} \\ b_{11d} & b_{12d} & b_{13d} & -b_{14d} & -b_{15d} & -b_{16d} \\ b_{21d} & b_{22d} & b_{23d} & -b_{24d} & -b_{25d} & -b_{26d} \end{bmatrix} \\
 L &= \begin{bmatrix} J_a \\ K_a \\ J_b \\ K_b \\ J_c \\ K_c \\ J_d \\ K_d \end{bmatrix} \\
 X &= \begin{bmatrix} d\omega \\ d\varphi \\ d\kappa \\ dX_L \\ dY_L \\ dZ_L \end{bmatrix} \quad V = \begin{bmatrix} V_{xa} \\ V_{ya} \\ V_{xb} \\ V_{yb} \\ V_{xc} \\ V_{yc} \\ V_{xd} \\ V_{yd} \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

(2.4)

2.2.4 Interseksi Spasial (*Space Intersection*)

Untuk mendapatkan posisi objek pada dunia nyata, maka diperlukan berkas sinar objek yang sama dari foto lainnya. Kedua berkas sinar akan berpotongan pada objek yang sama di dunia nyata. Perpotongan ini dinamakan interseksi spasial (Atkinson, 1996). Jika terdapat titik A di lapangan yang dapat diamati dari 2 foto, maka di setiap foto akan terdapat bayangan titik

tersebut. Apabila diketahui posisi kamera dan arah sumbu optiknya maka perpotongan sinar garis dari foto 1 dan foto 2 akan dapat menentukan posisi koordinat titik P tersebut (Wolf & Dewitt, 2000). Prinsip penentuan posisi dari perpotongan sinar ini dikenal dengan interseksi spasial.



Gambar 2.3 Interseksi Spasial (Leitch, 2002)

2.3 Sistem Koordinat dalam Videogrametri

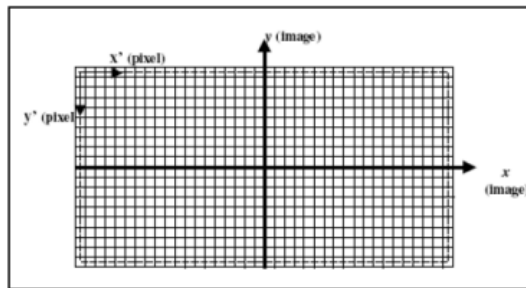
Pada konteks videogrametri sistem koordinatnya sama halnya dengan fotogrametri dan dikenal beberapa sistem koordinat yang berhubungan dengan foto udara, yaitu: sistem koordinat foto, sistem koordinat piksel, sistem koordinat kamera, dan sistem koordinat objek.

2.3.1 Sistem Koordinat Foto

Sistem koordinat foto adalah sistem koordinat dua dimensi sebuah foto dimana pada kamera non metrik maupun kamera metrik dimulai dari piksel tengah. Sumbu x positif ke arah kanan dan sumbu y positif ke arah atas (Tjahyadi, 2010).

2.3.2 Sistem Koordinat Piksel

Sistem koordinat piksel adalah sistem koordinat sebagai referensi titik terkecil pada sebuah foto, yang biasanya dinyatakan dalam satuan mm. Dimana pada kamera non metrik dimulai dari piksel kiri atas, sumbu x positif ke arah kanan (kolom), dan sumbu y positif ke arah bawah (baris).



Gambar 2.4 Sistem Koordinat Foto dan Sistem Koordinat Piksel (Tjahyadi, 2010)

2.3.3 Sistem Koordinat Kamera

Sistem koordinat kamera merupakan sistem koordinat 3D pada sebuah kamera dimana titik pusat berada pada *perspective center*. Sumbu (x, y) positif koordinat ini, sejajar dan *parallel* dengan sumbu (x, y) sistem koordinat objek.

2.3.4 Sistem Koordinat Objek 3D

Sistem koordinat objek merupakan sistem koordinat 3D yang digunakan sebagai representasi bentuk dan ukuran objek melalui transformasi dari sistem koordinat foto/piksel ke sistem koordinat objek (Tjahyadi, 2010).

Adapun untuk melakukan transformasi koordinat objek 3D dapat menggunakan metode transformasi

koordinat konform 3D. Persamaan modelnya sebagai berikut (Purworahardjo, 2000).

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \lambda R(\theta_z, \theta_y, \theta_x) \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} X_o \\ Y_o \\ Z_o \end{pmatrix} \quad (2.5)$$

dimana λ : faktor perbesaran
 $R(\theta_z, \theta_y, \theta_x)$: matrix rotasi

$$R(\theta_z, \theta_y, \theta_x) = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{pmatrix} \quad (2.6)$$

dimana $R(\theta_z, \theta_y, \theta_x)$:

$$\begin{aligned} r_{11} &= \cos \theta_z \cos \theta_y \\ r_{12} &= \cos \theta_z \sin \theta_y \sin \theta_x + \sin \theta_z \cos \theta_x \\ r_{13} &= -\cos \theta_z \sin \theta_y \cos \theta_x + \sin \theta_z \sin \theta_x \\ r_{21} &= -\sin \theta_z \cos \theta_y \\ r_{22} &= -\sin \theta_z \sin \theta_y \sin \theta_x + \cos \theta_z \cos \theta_x \\ r_{23} &= -\sin \theta_z \sin \theta_y \cos \theta_x + \cos \theta_z \sin \theta_x \\ r_{31} &= \sin \theta_y \\ r_{32} &= -\cos \theta_y \sin \theta_x \\ r_{33} &= \cos \theta_y \cos \theta_x \end{aligned}$$

2.4 Kalibrasi Kamera

Kalibrasi kamera dilakukan untuk menentukan *parameter internal* kamera (IOP) meliputi *principal distance* (c), titik pusat fidusial foto (x_o, y_o), distorsi lensa (K1, K2, K3, P1 and P2), serta distorsi akibat perbedaan penyekalaan dan ketidak ortogonal antara sumbu X dan Y (b1, b2) (Fraser, 1997).

Distorsi lensa dapat menyebabkan bergesernya titik pada foto dari posisi yang sebenarnya, sehingga memberikan ketelitian pengukuran yang tidak baik, namun tidak mempengaruhi kualitas ketajaman citra yang dihasilkan. Distorsi lensa dapat dibagi menjadi distorsi *radial* dan distorsi tangensial.

Distorsi *radial* adalah pergeseran linier titik foto dalam arah *radial* terhadap titik utama dari posisi idealnya (Wigrata, 1986). Distorsi lensa biasa diekspresikan sebagai fungsi polinomial dari jarak *radial* (r) terhadap titik utama foto. Distorsi *radial* direpresentasikan dalam sebuah persamaan polinomial sebagai berikut (Wolf & Dewitt, 2000):

$$\Delta r = K_1 r^3 + K_2 r^5 + K_3 r^7 \quad (2.7)$$

Dimana istilah dari Δr adalah jumlah dari distorsi lensa *radial*, r adalah jarak *radial* dari *principal point*, dan K_1 , K_2 , K_3 merupakan koefisien polinomial dari distorsi *radial*. Efek yang terjadi apabila pada kamera mempunyai nilai distorsi, maka gambar foto yang dihasilkan akan berbentuk cembung atau cekung, tergantung dari nilai *parameter* distorsi *radial* bernilai positif atau negatif (Wolf & Dewitt, 2000).

Distorsi tangensial adalah pergeseran linier titik di foto pada arah normal (tegak lurus) garis *radial* melalui titik foto tersebut (Wigrata, 1986). Distorsi tangensial disebabkan kesalahan sentering elemen-elemen lensa dalam satu gabungan lensa dimana titik pusat elemen-elemen lensa dalam gabungan lensa tersebut tidak terletak pada satu garis lurus. Pergeseran ini biasa dideskripsikan dengan 2 persamaan polinomial untuk pergeseran pada arah x (Δx) dan y (Δy) (Atkinson, 1996).

$$\begin{aligned} \Delta_x &= P_1[r^2 + 2(x - x_0)^2] + 2P_2(x - x_0)(y - y_0) \\ \Delta_y &= P_2[r^2 + 2(x - x_0)^2] + 2P_1(x - x_0)(y - y_0) \end{aligned} \quad (2.8)$$

Dimana P_1 dan P_2 merupakan koefisien dari *parameter* distorsi tangensial yang nilainya tergantung dari nilai panjang fokus kamera. Efek dari distorsi tangensial ini akan menyebabkan kesan hiperbolik pada foto yang terekam oleh kamera.

Berdasarkan lokasi, kalibrasi kamera dapat dilakukan dengan metode *laboratory calibration* serta *On-the-job calibration*. *Laboratory calibration* dilakukan di laboratorium, terpisah dengan proses pemotretan objek. Metode yang termasuk di dalamnya antara lain *optical laboratory* dan *test range calibration*. Secara umum metode ini sesuai untuk kamera jenis metrik. Metode ini terdiri dari metode multikolimator dan goniometer di mana masing – masing memerlukan alat yang khusus dan mahal. Pada metode multikolimator, objek (berupa tanda silang kotak) yang akan dipotret diletakkan di atas sebuah pelat kaca, yang diproyeksikan melalui sejumlah kolimator *individual* yang dipasang dengan sudut θ tertentu (nilainya sudah diketahui) ke bidang fokus kamera. Dari tanda silang kotak yang terproyeksi pada bidang fokus dapat diukur panjang fokus ekivalen dan *radial* lensa pada tiap penambahan sudut θ .

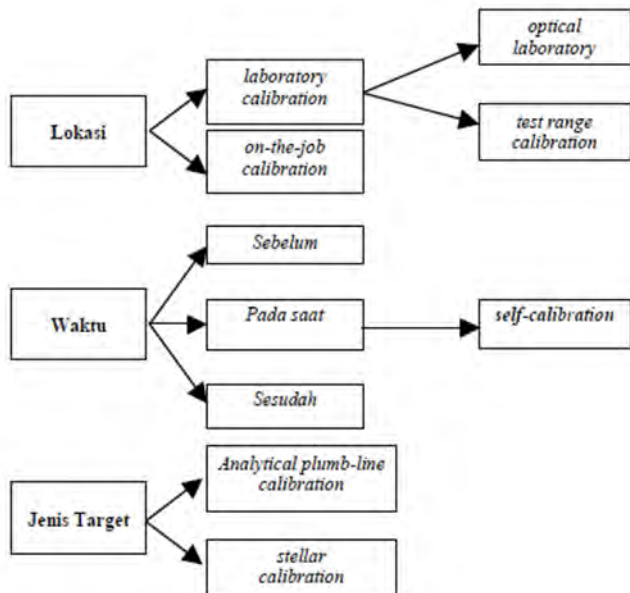
Pada metode goniometer, objek berupa pelat *grid* yang disinari dari belakang. *Grid* ini kemudian diproyeksikan melalui lensa kamera pada arah berlawanan. Sudut dimana sinar *grid* yang timbul, diukur dengan goniometer. Besarnya panjang fokus ekivalen dan distorsi *radial* lensa ditentukan dengan membandingkan sudut terukur sebenarnya terhadap sudut yang benar menurut teori.

On-the-job calibration merupakan teknik penentuan *parameter* kalibrasi lensa dan kamera yang dilakukan bersamaan dengan pelaksanaan pemotretan objek.

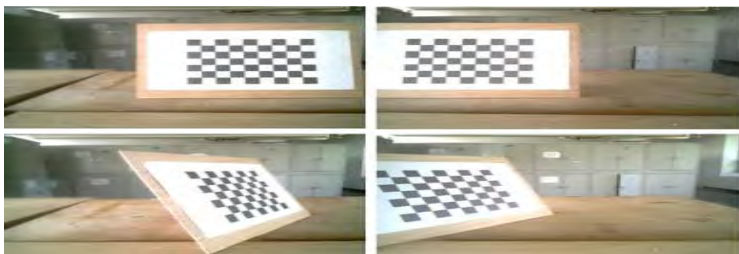
Berdasarkan waktu, kalibrasi kamera dapat dilakukan sebelum pemotretan, pada saat pemotretan, maupun sesudah pemotretan. Kalibrasi sebelum maupun sesudah pemotretan, biasa dilakukan di laboratorium atau di lokasi pemotretan. Kalibrasi pada saat pemotretan dikenal dengan *self-calibration*, yakni mengkalibrasi kamera sekaligus pada objek amat dan data diambil bersamaan dengan data observasi. Pada *self-calibration* pengukuran titik-titik target pada objek pengamatan digunakan

sebagai data untuk penentuan titik objek sekaligus untuk menentukan *parameter* kalibrasi kamera (Atkinson, 1996).

Metode kalibrasi berdasarkan jenis target antara lain dengan *analytical plumb-line calibration* dan *stellar calibration* (Fryer, 1989).



Gambar 2.5 Tipe Kalibrasi Kamera (Hanifa, 2007)

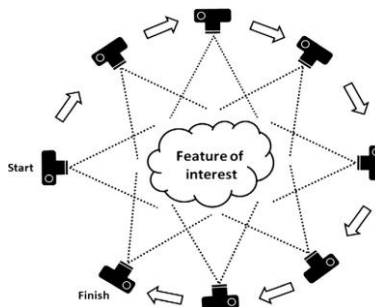


Gambar 2.6 Bidang Kalibrasi Kamera (Brilakis, et al., 2011)

2.5 Kualitas Rekonstruksi 3D Bangunan

2.5.1 *Structure From Motion (SfM)*

Structure from Motion (SfM) mempunyai prinsip seperti fotogrametri stereoskopik yang menghasilkan struktur 3D dari hasil sekumpulan *offset* dan *overlap* gambar. Teknik ini membutuhkan foto yang saling *overlap* sebagai *input* algoritma untuk ekstraksi fitur dan rekonstruksi 3D. Namun, SfM sedikit berbeda secara mendasar dari fotogrametri konvensional dimana posisi dan orientasi kamera secara otomatis tanpa membutuhkan spesifikasi jaringan target posisi 3D. Proses SfM menggunakan reduksi data dan prosedur iterasi *bundle adjustment* berdasarkan fitur yang terekstrak dari gambar yang saling *overlap*, sehingga pendekatan ini cocok untuk sekumpulan gambar struktur objek 3D dengan tingkat *overlap* yang tinggi (teknik videogrametri) (Westoby, et al., 2012).



Gambar 2.7 Teknik *Structure from Motion* (Westoby, et al., 2012)

Permasalahan utama dalam SfM adalah penentuan lokasi 3D dari fitur yang cocok dalam beberapa foto yang diambil dari sudut pandang yang berbeda. Solusi dari permasalahan ini adalah mengidentifikasi fitur dalam tiap foto yang mungkin digunakan sebagai

korespondensi gambar yang *popular* digunakan adalah sistem pengenalan objek *Scale Invariant Feature Transform* (SIFT). Algoritma ini mengidentifikasi fitur tiap gambar yang tetap pada *scaling* dan rotasi gambar yang sedikit berubah pada kondisi iluminasi dan sudut pandang 3D kamera. Pada foto terdapat *key point* yang diidentifikasi secara otomatis di seluruh skala dan lokasi pada tiap gambar dan diikuti dengan pembuatan *feature descriptor* yang dihitung dengan mentransformasikan gradien gambar lokal ke dalam representasi yang sangat tidak *sensitive* terhadap berbagai iluminasi dan orientasi (Lowe, 2004).



Gambar 2.8 *SIFT Feature Detection* (Snively, 2010)

Dalam beberapa tahun terakhir, bidang fotogrametri digital tumbuh dengan pesat. Kemajuan teknologi *computer vision* fokus dalam pengembangan algoritma otomatis ekstrak informasi data sedangkan fotogrametri lebih fokus dalam pengembangan algoritma untuk memperoleh informasi data yang diperlukan seefisien mungkin (Förstner, 2002). Urutan gambar video (*video image sequence*) menjadi sumber data penting dan

dianalisis oleh peneliti di bidang *computer vision* selama beberapa dekade terakhir. Sehingga *video image sequence* dengan latar belakang pengembangan fotogrametri telah menarik perhatian banyak orang dari segi biaya yang ekonomis, prosedur akuisisi data yang fleksibel, pendekatan automasi SfM untuk keperluan rekonstruksi 3D bangunan.

Alasan dan manfaat mengapa menggunakan *video image sequence* sebagai sumber data pemodelan rekonstruksi objek 3D bangunan (Tian, 2011), yaitu:

1. Harga ekonomis untuk pengadaan alat dan proses akuisisi data sederhana.
2. Memerlukan keterampilan operator yang tidak terlalu tinggi dalam melakukan pengambilan data khususnya untuk kegiatan pemodelan rekonstruksi 3D bangunan.
3. Minim perubahan fotometrik dalam gambar.
4. Presentase tinggi pada *overlap* gambar yang berdekatan.



Gambar 2.9 *Stereo Videogrametri* (Brilakis, et al., 2011)



Gambar 2.10 Survei Videogrametri (Brilakis, et al., 2011)

2.5.2 Level of Detail (LOD)

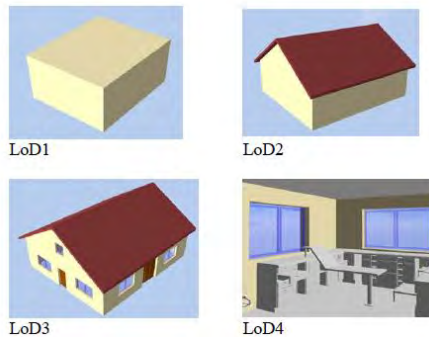
Proses pembuatan rekonstruksi 3D bangunan terdapat tingkat klasifikasi terhadap tingkat kedetailan yang dihasilkan. Pengklasifikasian tersebut dibagi menjadi lima kelas dan disebut *dengan level of detail (LOD)*. Pengklasifikasian LOD meliputi:

1. LOD 0, *Regional Model* berupa *digital terrain model*.
2. LOD 1, *City/Site Model* berupa model blok tanpa atap.
3. LOD 2, *City/Site Model* berupa model dengan tekstur dan struktur atap sederhana.
4. LOD 3, *City/Site Model* berupa arsitektur yang mendetail.
5. LOD 4, *Interior Model* berupa model arsitektur dari interior bangunan.

Tabel 2.1 Syarat Orde LOD (Fan & Meng, 2009)

Aspek	LOD 1	LOD 2	LOD 3	LOD 4
Skala model	Kota, <i>regional</i>	Distrik dalam kota	Model arsitektur (eksterior), <i>landmark</i>	Model arsitektur (termasuk interior)
Kelas akurasi	Rendah	Menengah	Tinggi	Sangat tinggi
Akurasi posisi	5 meter	2 meter	0,5 meter	0,2 meter
Generalisasi	Objek berukuran > 6x6 m	Objek berukuran > 4x4 m	Objek sebagai fitur nyata > 2x2 m	Elemen – elemen konstruktif ditampilkan
Instalasi bangunan	-	-	Efek <i>visual</i> eksterior representatif	Objek dalam bentuk ukuran sebenarnya
Struktur	Datar	Tipe dan orientasi atap	Sesuai bentuk objek sebenarnya	Sesuai bentuk objek sebenarnya

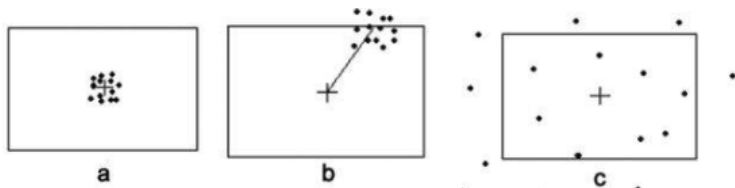
Jika dikaitkan dengan bidang arsitektur, model 3D terdiri dari model objek yang akan dimodelkan dan permukaan model tersebut, sehingga model 3D yang diperlukan hanya sebatas model permukaan saja (Toz & Duran, 2002).



Gambar 2.11 *Level of Detail* (Fan & Meng, 2009)

2.5.3 Ketelitian Geometrik Rekonstruksi 3D Bangunan

Kegiatan rekonstruksi 3D bangunan harus mempertimbangkan akurasi dan presisi agar visualisasi 3D yang dihasilkan berkualitas. Sehingga akurasi dan presisi adalah faktor yang perlu diperhatikan dalam pembuatan GCP yang berkualitas. Perbedaan akurasi dan presisi sebagai berikut.



Gambar 2.12 Akurasi (a) dan Presisi (b) (Ghilani & Wolf, 2012)

Adapun untuk mengetahui ketelitian geometriknya dapat dinyatakan dengan *Root Mean Square Error* (RMSE) yang digunakan untuk menyatakan akurasi suatu prediksi besaran dengan persamaan sebagai berikut.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_{1,i} - x_{2,i})^2}{n}} \quad (2.9)$$

Keterangan :

$x_{1,i}$: nilai prediksi ke-i
 $x_{2,i}$: nilai pengamatan ke-i
 n : jumlah pengamatan.

Sedangkan standar deviasi lebih menunjukkan kecenderungan penyebaran nilai suatu prediksi terhadap nilai prediksi rata – ratanya sendiri. Standar deviasi digunakan dalam menyatakan presisi dan didefinisikan dengan persamaan :

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2}{n - 1}} \quad (2.10)$$

Keterangan :

\bar{x} : nilai rata – rata prediksi
 x_i : nilai prediksi ke-i.

Sedangkan untuk mengevaluasi hasil ketelitian nilai geometriknya dapat dilakukan dengan uji nilai korelasi pearson, uji standar kesalahan (*error probability*) dan analisis data secara kualitatif.

Uji nilai korelasi pearson digunakan untuk mengetahui keeratan hubungan antar dua variabel (ukuran linier variabel) (Ghilani, 2010). Adapun hubungan antara dua variabel tersebut (r) ada 3 kemungkinan yaitu:

1. Korelasi linier positif (+1), perubahan nilai variabel x dan y secara teratur dengan arah yang sama. Apabila nilai koefisien korelasi (r)

- mendekati +1, maka variabel x dan y mempunyai korelasi linier positif yang kuat.
2. Korelasi linier negatif (-1), perubahan nilai variabel x dan y secara teratur dengan arah yang berlawanan. Apabila nilai koefisien korelasi (r) mendekati +1, maka variabel x dan y mempunyai korelasi linier negatif yang kuat.
 3. Tidak berkorelasi (0).

Rumus uji nilai korelasi pearson:

$$r = \frac{n\sum xy - (\sum x)(\sum y)}{\sqrt{\{n\sum x^2 - (\sum x)^2\} \{n\sum y^2 - (\sum y)^2\}}}$$

(2.11)

Uji standar kesalahan umumnya digunakan untuk mengevaluasi hasil pengukuran yang akan diterima maupun yang ditolak (Ghilani, 2010). Tingkat kepercayaan yang umum digunakan untuk uji standar kesalahan adalah 90% atau 95%. Berikut tabel tingkat kepercayaan untuk uji standar kesalahan.

Tabel 2.2 Faktor Pengali Uji Standar Kesalahan (Ghilani, 2010)

Simbol	Faktor Pengali	Presentase Tingkat Kepercayaan
E_{50}	0.6745σ	50
E_{90}	1.645σ	90
E_{95}	1.960σ	95
E_{99}	2.57σ	99
$E_{99.7}$	2.968σ	99.7
$E_{99.9}$	3.29σ	99.9

Analisa data secara kualitatif menurut Suharsimi Arikunto (2010) dilakukan dengan memanfaatkan presentase yang dinyatakan dalam sebuah predikat yang menunjuk pada pernyataan keadaan, ukuran kualitas. Suharsimi Arikunto memasukkan perhitungan presentase ke dalam lima kategori predikat yaitu:

1. Sangat baik (81-100%),
2. Baik (61-80%),
3. Cukup (41-60%),
4. Kurang baik (21-40%)
5. dan tidak baik (0-20%)

2.5.4 Distribusi Titik Kontrol dan Titik Ikat

Ground Control Point (GCP) atau titik kontrol adalah titik lokasi yang diketahui atau diidentifikasi dalam ruang nyata (di tanah), GCP digunakan untuk verifikasi posisi fitur peta dan berfungsi sebagai titik sekutu antara sistem koordinat peta dan sistem koordinat foto. *Independent Check Point* (ICP) atau titik cek berfungsi sebagai kontrol kualitas dari objek dengan cara membandingkan koordinat model dengan koordinat sebenarnya. GCP dan ICP pada umumnya dibuat menyebar dipinggiran foto dan diadakan dengan dua cara, yaitu;

1. *Pre-Marking* adalah pengadaan titik target sebelum pemotretan (perekaman) dilaksanakan.
2. *Post-marking* adalah mengidentifikasi objek yang terdapat pada foto kemudian ditentukan koordinat petanya.

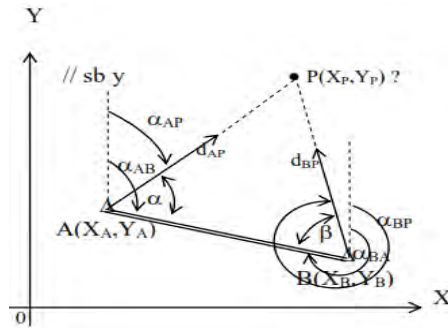
Tie Point atau titik ikat adalah titik sekutu yang merupakan titik sekutu antar foto yang saling bertampalan. *Tie Point* selalu dibuat dengan cara *post-marking*, yaitu mengidentifikasi objek yang sama pada daerah foto yang bertampalan.

Teknik untuk memperoleh GCP dan ICP adalah menggunakan GPS Geodetik dan pengikatan ke muka. Prinsip dasar penentuan posisi dengan GPS adalah reseksi (pengikatan ke belakang) dengan jarak, yaitu pengukuran jarak secara simultan ke beberapa satelit GPS yang koordinatnya diketahui.

Tabel 2.3 Pengelompokan Metode Penentuan Posisi dengan GPS
(Abidin, 2007)

Metode	Absolut	<i>Differential</i>	Titik	<i>Receiver</i>
Statik	√	√	Diam	Diam
Kinematik	√	√	Bergerak	Bergerak
<i>Rapid Statik</i>	-	√	Diam	Diam (singkat)
<i>Pseudo-kinematik</i>	-	√	Diam	Diam dan Bergerak
<i>Stop and go</i>	-	√	Diam	Diam dan Bergerak

Sedangkan prinsip penentuan posisi dengan cara pengikatan ke muka dapat ditentukan minimal harus diketahui dua buah titik yang diketahui koordinatnya. Adapun yang menjadi persyaratan teknik dalam pelaksanaannya adalah bahwa ketiga titik tersebut: 2 (dua) titik ikat dan 1 (satu) titik yang ditentukan koordinatnya satu sama lain harus saling terlihat. Titik ikat adalah sebutan untuk titik yang diketahui koordinatnya (Ghilani & Wolf, 2012).



Gambar 2.13 Pengikatan ke Muka (Ghilani & Wolf, 2012)

2.6 Unmanned Aerial Vehicle (UAV)

Unmanned Aerial Vehicle (UAV) adalah teknologi kendaraan udara tak berpilot yang dikendalikan dari jarak jauh baik semi-otomatis maupun secara otomatis. Terminologi terbaru UAV menjelaskan bahwa *platform* ini dapat beroperasi dan dikendalikan dari jarak jauh baik secara semi-otomatis maupun otomatis tanpa perlu pilot duduk di kendaraan. *Platform* ini dilengkapi dengan kemampuan untuk melakukan pengukuran fotogrametri maupun videogrametri baik secara skala kecil maupun besar dengan menggunakan sistem kamera atau kamera video (*on board*), sistem kamera termal atau inframerah, sistem LiDAR, atau kombinasi ketiganya. UAV standar saat ini memungkinkan pendaftaran, pelacakan posisi dan orientasi dari sensor yang diimplementasikan dalam sistem lokal atau koordinat global. Oleh karena itu, teknologi UAV ini dapat dipahami sebagai alat pengukuran fotogrametri dan videogrametri terbaru (Esienbeiß, 2009).

Tabel 2.4 Fitur Pengukuran *Aerial*, Jarak Dekat, UAV (Eisenbeiß, 2009)

<i>Point</i>	<i>Aerial</i>	Jarak dekat	UAV Fotogrametri/ Videogrametri
Perencanaan	Semi-otomatis	<i>Manual</i>	Otomatis- <i>manual</i>
Akuisisi data	<i>Manual</i>	Otomatis/ <i>Manual</i>	Otomatis/ <i>Manual</i>
Ukuran Luas Wilayah	km ²	mm ² – m ²	m ² – km ²
Resolusi Gambar/GSD	cm-m	mm – dm	mm – m
Jarak ke Objek	100 m – 10 km	cm – 300 m	m – km
Orientasi	Normal/Miring	Normal/Miring	Normal/Miring
Nilai Akurasi	cm – dm	mm – m	cm – 10 m
Jumlah Pemindaian Gambar	10 – 1000	1-500	1 – 1000
Pengaplikasian	<ul style="list-style-type: none"> - Wilayah skala besar (pemetaan, kehutanan, glasiologi, <i>3D Modelling</i>) 	<ul style="list-style-type: none"> - Wilayah skala kecil (arkeologi, <i>3D modelling</i>) - Terestris 	<ul style="list-style-type: none"> - Wilayah skala besar dan kecil (arkeologi, pemantauan potensi bencana, <i>3D modelling</i>) - Wilayah yang sulit dijangkau dan berbahaya - Pemantauan saat itu juga (<i>real-time</i>)

Tabel 2.5 Spesifikasi Sensor Kamera UAV (DJI Corporation, 2016)

Spesifikasi Sensor Kamera UAV	
Sensor	Sony EXMOR 1/2.3" Effective pixels: 12.4 M (total pixels: 12.76 M)
Lensa	FOV 94° 20 mm (35 mm format equivalent) f/2.8, focus at ∞
Rentang ISO	100-3200 (video) 100-1600 (photo)
Shutter Speed	8s -1/8000s
Ukuran Maksimal Gambar	4000 x 3000
Mode Fotografi	Single Shot, Burst Shooting: 3/5/7 shots, Auto Exposure Bracketing (AEB): 3/5, Bracketed Frames at 0.7EV Bias, Time-lapse
Mode Video	2.7K: 2704 x1520p 24/25/30 (29.97), FHD: 1920x1080p 24/25/30/48/50/60, HD: 1280x720p 24/25/30/48/50/60

2.7 Resensi Penelitian Terdahulu

2.7.1 *Building Reconstruction from Terrestrial Video Sequences*

Penelitian Yixiang Tian dari *University of Twente* bulan Juni 2011 menjelaskan konsep model 3D bangunan untuk keperluan perencanaan kota, *virtual* pariwisata, navigasi, dan area tanggap darurat menggunakan pendekatan *Struture from Motion* (SfM). Pendekatan SfM ini menggunakan urutan gambar video sebagai sumber data untuk keperluan rekonstruksi objek secara otomatis. Keuntungan pendektan SfM dapat menekan biaya pengolahan data foto dalam jumlah besar dan efisiensi waktu pengambilan data. Selain itu, keuntungan lain menggunakan pendekatan SfM adalah urutan frame video yang didapatkan mempunyai

overlap yang tinggi untuk setiap fitur objek, sehingga lebih mudah untuk diidentifikasi. Selanjutnya, model rekonstruksi 3D bangunan ini dievaluasi dengan kesesuaian permukaan, akurasi geometris, dan kesesuaian topologi. Hasil akhir penelitian ini menunjukkan bahwa pendekatan SfM untuk rekonstruksi model 3D bangunan sesuai dengan topologi antara potongan gambar permukaan bangunan dan diperoleh model rekonstruksi 3D di daerah objek yang sulit direkam. Rata-rata kelengkapan visualisasi rekonstruksi 3D bangunan menggunakan pendekatan SfM mencapai 94% dan akurasi permukaannya mencapai 97%. Sehingga metode SfM berhasil memenuhi toleransi persyaratan geometri untuk model bangunan LOD4.

2.7.2 *Progressive 3D Reconstruction of Infrastructure with Videogrammetry*

Penelitian yang dilakukan oleh Ioannis Brilakis dkk. dari *Dept. of Civil and Env. Engineering, Georgia Institute of Technology, United States* menjelaskan frame video yang dihasilkan dari teknik videogrametri untuk memperoleh data spasial yang digunakan untuk rekonstruksi 3D bangunan. Penelitian ini menggunakan kamera terkalibrasi dengan video resolusi tinggi sebagai sensor untuk mengamati objek bangunan dan bertujuan memperoleh *dense 3D point cloud* yang diperbarui pada setiap *frame* (potongan) videonya. Penelitian ini menekankan pada keunggulan metode videogrametri terhadap harga yang relatif murah dengan akurasi yang baik, sehingga dapat digunakan untuk mengatasi kelemahan dari metode yang umum digunakan untuk rekonstruksi 3D bangunan seperti teknologi laser (LiDAR, TLS, dsb) yang relatif mahal proses pengerjaannya.

2.7.3 Videogrammetric Technique for Three-Dimensional Structural Progressive Collapse Measurement

Penelitian yang dilakukan oleh Xianglei Liu dkk. dari *Beijing University of Civil Engineering and Architecture* menjelaskan tentang pengukuran dengan teknik videogrametri kecepatan tinggi untuk mengamati reruntuhan struktur bangunan secara progresif. Hal pokok yang dibahas pada penelitian ini adalah teknik *stereo* videogrametri, kalibrasi kamera, kontrol jaring dinamis dan pengolahan data raster (*image processing*). Hasil akhir dari penelitian ini yaitu diperoleh Koordinat 3D (X, Y, Z) dengan ketelitian absolut 0.43 mm, 0.87 mm, dan 0.65 mm dan ketelitian relatif 0.61 mm, 0.29 mm, dan 0.62 mm, sehingga pengukuran dengan teknik videogrametri merupakan alternatif dalam mengatasi kelemahan dari sensor spasial (*traditional transducer*) untuk mengamati reruntuhan struktur bangunan secara progresif.

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Lokasi Penelitian

Lokasi penelitian adalah Candi Singasari yang terletak di Desa Candi Renggo, Kecamatan Singosari, Kabupaten Malang, kurang lebih 9 km dari kota Malang ke arah Surabaya dan berada pada koordinat geografis 7°53'16.94" LS dan 112°39'46.8" BT (Perpustakaan Nasional RI, 2014).



Gambar 3.1 Lokasi Penelitian (Google, 2015)



Gambar 3.2 Struktur Candi Singasari (Survei, 2015)

3.2 Data dan Peralatan

3.2.1 Data

Data yang diperlukan dalam penelitian ini antara lain:

1. Bidang kalibrasi kamera 2D berupa gambar (frame video) papan catur (*chessboard*) bidang kalibrasi.
2. Data spesifikasi Dji Phantom 3 Adv. 1080P60 Camera (*on board*).
3. Data ukuran *Bench Mark* (BM).
4. Data ukuran GCP dan ICP pada Candi Singasari.
5. Data frame video struktur Candi Singasari.

3.2.2 Peralatan

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini meliputi:

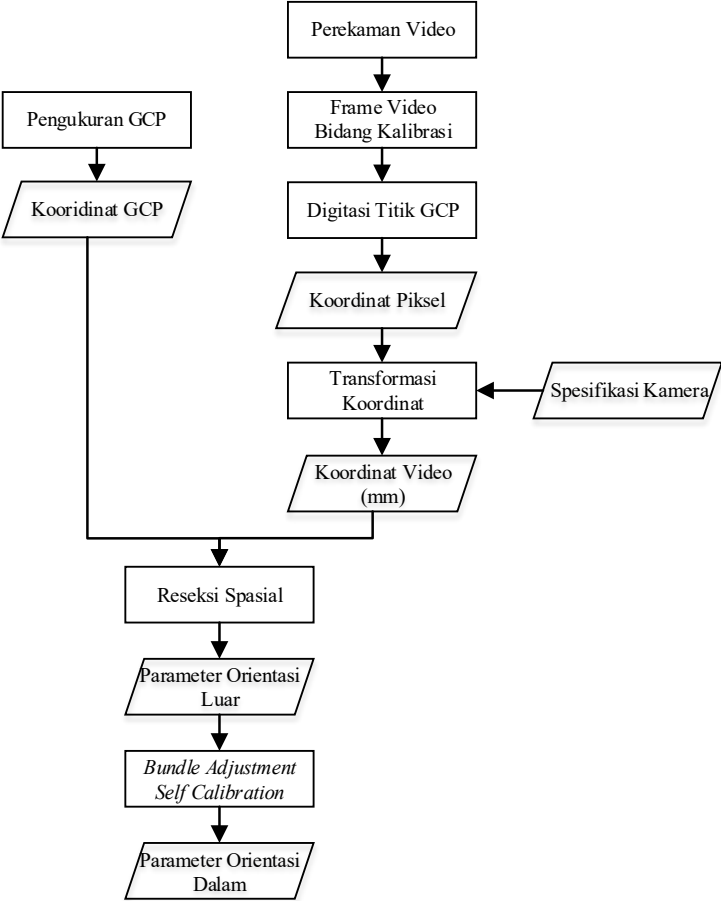
1. Perangkat keras (*Hardware*)
 - a. Wahana Dji Phantom 3 Adv. 1080P60 Camera (*on board*) sebagai alat perekaman video struktur Candi Singasari.
 - b. *Total Station* (TS) untuk pengukuran GCP dan ICP struktur Candi Singasari.
 - c. 2 set *Receiver* GPS Geodetik untuk pengukuran kerangka dasar.
 - d. Laptop dengan spesifikasi RAM 4 GB, Intel Processor i5 3337U 1.8 GHz, dan NVIDIA Video Graphics 2 GB sebagai alat pengolahan data.
 - e. Penggaris sebagai alat pengukur objek bidang kalibrasi.
2. Perangkat lunak (*Software*)
 - a. MATLAB 2013 untuk pengolahan kalibrasi kamera.
 - b. *Topcon Tools* untuk penyajian koordinat GCP.
 - c. *Video to .jpg converter* untuk pemotongan video.

- d. *Visual SfM windows* cuda 64bit dan MeshLab.
- e. *Microsoft Office 2013* untuk penyajian dan pelaporan hasil penelitian.

3.3 Metodologi Penelitian

3.3.1 Tahap Kalibrasi Kamera

Pada penelitian ini proses kalibrasi kamera dilakukan dengan menggunakan aplikasi MATLAB berdasarkan persamaan *Bundle adjustment Self Calibration* (BASC). Tahap kalibrasi kamera ditunjukkan pada diagram alir berikut.

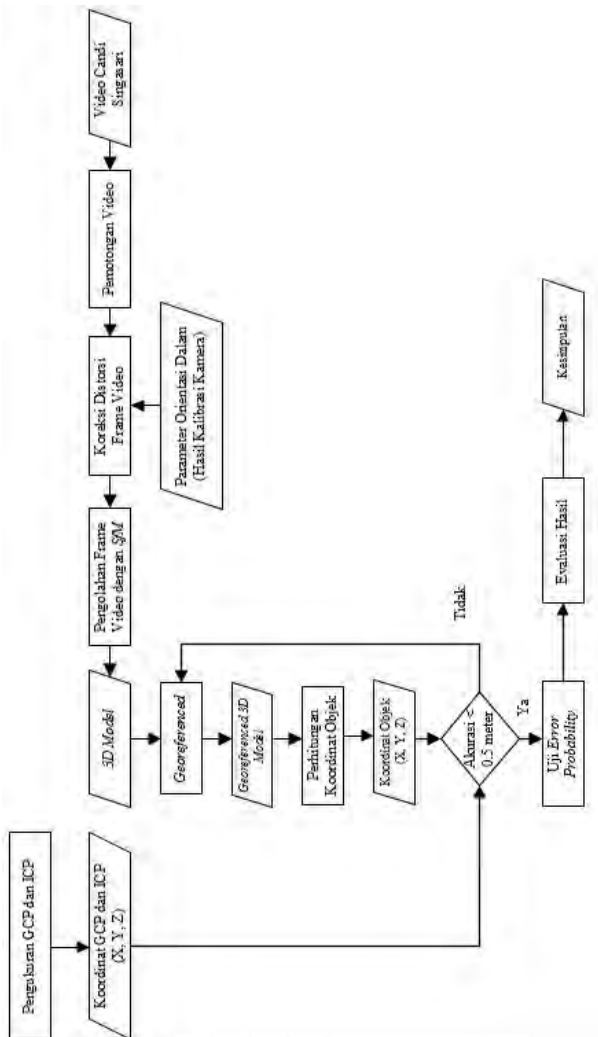


Gambar 3.3 Proses Kalibrasi Kamera

Proses kalibrasi kamera sebagai berikut:

- a. Pencetakan bidang kalibrasi pada kertas A4 (21 cm x 29,7 cm)
- b. Menentukan dan mengukur titik GCP pada bidang kalibrasi menggunakan penggaris untuk mendapatkan koordinat GCP (dalam satuan cm).
- c. Melakukan perekaman bidang kalibrasi.
- d. Melakukan digitasi GCP pada frame video bidang kalibrasi tersebut untuk mendapatkan koordinat GCP dalam satuan piksel.
- e. Melakukan transformasi koordinat GCP pada frame video ke dalam satuan piksel ke koordinat GCP dalam satuan milimeter sesuai dengan ukuran sensor yang digunakan.
- f. Melakukan proses reseksi spasial untuk mendapatkan nilai *parameter* orientasi luar (EOP).
- g. Melakukan proses *Bundle adjustment Self Calibration* (BASC) untuk mendapatkan nilai *parameter* orientasi dalam (IOP) yaitu panjang fokus kamera (f), koordinat *principal point* (x_0 , y_0) serta distorsi *radial* dan tangensial (k_1 , k_2 , k_3 , p_1 dan p_2).

3.3.2 Tahap Pengolahan Data



Gambar 3.4 Proses Pengolahan Data

Proses pengolahan data sebagai berikut.

- a. Data pengukuran kerangka dasar merupakan acuan pengukuran GCP dan ICP dalam sistem koordinat UTM. Koordinat GCP dan ICP ini digunakan sebagai ukuran referensi untuk menentukan unsur – unsur objek penelitian yang tampak di frame video struktur Candi Singasari.
- b. Setelah melakukan pengukuran titik GCP dan ICP, perekaman akan dilakukan untuk mendapatkan data video objek Candi Singasari. Perekaman video dilakukan di udara menggunakan metode *aerial videogrametri*. Mode perekaman video menggunakan mode FHD: 1920x1080p.
- c. Selanjutnya dilakukan pemotongan video dari hasil perekaman video menggunakan perangkat lunak *video to .jpg converter*. Pemotongan video dilakukan untuk identifikasi kerapatan gambar video yang berdekatan.
- d. Melakukan koreksi frame video objek Candi Singasari menggunakan *parameter* dalam kamera yang telah didapatkan melalui proses kalibrasi kamera. Hal ini dilakukan untuk meminimalisir efek distorsi dari frame video tersebut.
- e. Melakukan pengolahan frame video menggunakan aplikasi SfM (*Structure for Motion*) untuk memperoleh bentuk 3D Candi Singasari (3D Model). Pengolahan frame video menggunakan pendekatan SfM untuk pemodelan rekonstruksi 3D bangunan, meliputi;
 1. Orientasi relatif objek untuk mengetahui posisi relatif kamera satu dengan yang lainnya.

2. Pembentukan *point cloud* atau sekumpulan ribuan titik hasil kecocokan antar frame video untuk membentuk struktur objek.
 3. Pembentukan *meshing* atau proses triangulasi permukaan objek berdasarkan hasil *point cloud*.
 4. Pembentukan *texturing* untuk memperoleh tampilan visualisasi 3D yang menarik.
- f. Selanjutnya dilakukan penyamaan sistem koordinat bentuk 3D Candi Singasari dengan cara *georeferenced* dari titik GCP dan ICP dari hasil pengukuran lapangan.
 - g. Melakukan uji *t-student* koordinat ICP yang diperoleh dari hasil pengukuran di lapangan dan hasil dari bentuk pemodelan rekonstruksi 3D Candi Singasari.
 - h. Evaluasi data meliputi beberapa *parameter*, yaitu:
 1. Evaluasi bentuk *visual* 3D Candi Singasari menggunakan metode *aerial* videogrametri.
 2. Evaluasi uji korelasi dua variabel, *root mean square error* (RMSE), dan uji standar kesalahan koordinat ICP dari hasil pengukuran di lapangan dan hasil dari bentuk pemodelan rekonstruksi 3D Candi Singasari.

3.3.3 Tahap Akhir

Tahap akhir dari penelitian ini meliputi:

1. Evaluasi bentuk *visual* 3D struktur Candi Singasari.
2. Evaluasi hasil dari uji korelasi dua variabel, *root mean square error* (RMSE), dan uji standar kesalahan koordinat ICP dari hasil pengukuran di lapangan dan hasil dari bentuk pemodelan rekonstruksi 3D Candi Singasari.
3. Laporan akhir.

BAB IV HASIL DAN ANALISA

4.1 Hasil Pengolahan Data

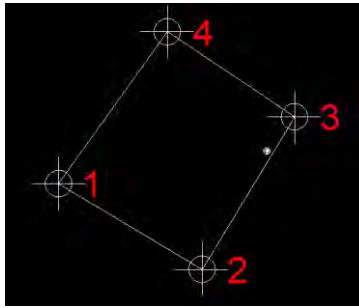
4.1.1 Perhitungan Kerangka Dasar

Sistem koordinat yang digunakan pada pengukuran ini adalah sistem Koordinat UTM yang mengacu pada kerangka dasar dua buah *Bench Mark* dan dua buah titik (*intial point*) membentuk poligon tertutup terikat sempurna. Kerangka dasar ini diukur menggunakan GPS Geodetik dengan metode *Differential Positioning* yaitu penentuan posisi suatu titik secara relatif terhadap lainnya yang telah diketahui koordinatnya (Abidin, 2006) dan *Total Station* membentuk kerangka dasar berupa poligon tertutup. Koordinat titik poligon ditunjukkan dalam tabel berikut.

Tabel 4.1 Koordinat Titik Poligon dalam Sistem Koordinat UTM

Titik	<i>Easting</i> (m)	<i>Northing</i> (m)	<i>Z</i> (m)
1	683434,769	9127721,154	20,000
2	683461,723	9127705,018	19,994
3	683479,134	9127733,700	20,155
4	683455,201	9127749,714	20,135

Hasil perhitungan dari kerangka kontrol ini mempunyai nilai kesalahan penutup sudut sebesar 8 detik.



Gambar 4.1 Kerangka Dasar Pengukuran

Untuk proses selanjutnya hasil dari koordinat poligon ini digunakan sebagai titik kontrol koordinat GCP dan ICP pada struktur Candi Singasari. Koordinat GCP dan ICP diukur menggunakan *Total Station* dengan metode pengikatan ke muka.

4.1.2 Perhitungan GCP dan ICP

Titik kontrol (GCP dan ICP) pada penelitian ini merupakan titik – titik yang diambil pada struktur Candi Singasari yang diukur menggunakan alat *Total Station*. Titik kontrol ini digunakan sebagai titik acuan yang akan digunakan dalam proses *georeferenced* pada frame video Candi Singasari. GCP digunakan untuk proses *georeferencing* sedangkan ICP digunakan sebagai titik pembanding. Pengukuran ini menggunakan pengikatan ke muka dimana koordinat yang ditentukan dapat dicari dari dua buah titik tetap yang sudah diketahui, kemudian diukur sudut dan jarak dari titik tetap ke arah titik yang akan dicari koordinatnya (Supadiningsih, 2004). Hasil perhitungan GCP dan ICP ditunjukkan dalam tabel berikut.

Tabel 4.2 Koordinat GCP dan ICP Struktur Candi Singasari

Titik	Pengukuran di Lapangan		
	<i>Easting (m)</i>	<i>Northing (m)</i>	<i>Z (m)</i>
GCP 1	683428,414	9127749,611	22,024
GCP 2	683433,471	9127738,039	22,026
GCP 3	683445,033	9127743,164	22,028
GCP 4	683439,920	9127754,710	22,030
ICP 1	683431,391	9127748,566	25,124
ICP 2	683438,115	9127751,475	25,111
ICP 3	683441,156	9127744,082	25,105
ICP 4	683434,562	9127741,188	25,106
ICP 5	683434,120	9127747,622	29,710
ICP 6	683437,948	9127748,176	29,706
ICP 7	683435,454	9127743,040	29,711
ICP 8	683439,587	9127745,496	29,709
ICP 9	683437,979	9127749,294	31,670
ICP 10	683433,351	9127747,019	31,675
ICP 11	683435,576	9127743,396	31,676
ICP 12	683439,321	9127745,644	31,672



Gambar 4.2 Persebaran GCP dan ICP Tampak Depan



Gambar 4.3 Persebaran GCP dan ICP Tampak Belakang

4.1.3 Kalibrasi Kamera

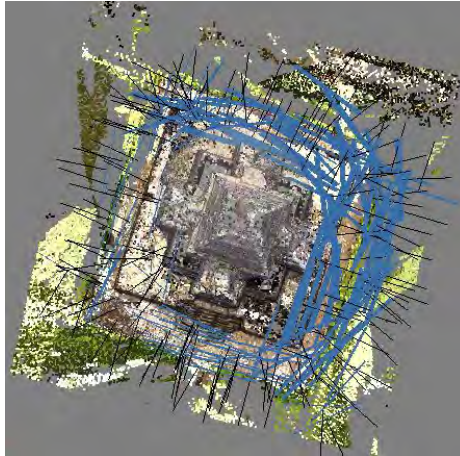
Proses kalibrasi kamera menggunakan metode *Bundle adjustment Self Calibration (BASC)* dilakukan bersamaan dengan proses *feature detection* dan *feature mathing*. Sehingga didapatkan parameter internal (IOP) dari proses kalibrasi kamera sebagai berikut.

Tabel 4.3 Hasil Kalibrasi Kamera

IOP	Nilai (mm)
f	3,778175
X₀	3,269564
Y₀	1,1811622
K₁	5,172e-004
K₂	-5,316e-006
K₃	0,000e+000
P₁	-4,260e-005
P₂	-9,087e-005

4.1.4 Pemodelan Rekonstruksi 3D

Pengolahan data berupa frame video sejumlah 161 frame telah diolah dengan menggunakan perangkat lunak *SfM*. Berikut adalah hasil dari pemodelan rekonstruksi 3D:



Gambar 4.4 Posisi Pengambilan Frame Video

Hasil dari pengolahan data frame video berupa *point cloud* dari ekstraksi model 3D, selanjutnya dilakukan *texturing*, sehingga membentuk model 3D, sebagai berikut.



Gambar 4.5 Model 3D Tampak Depan



Gambar 4.6 Model 3D Tampak Belakang



Gambar 4.7 Model 3D Tampak Depan Samping Kanan



Gambar 4.8 Model 3D Tampak Depan Samping Kiri



Gambar 4.9 Model 3D Tampak Atas

4.1.5 Koordinat ICP Pemodelan 3D

Nilai koordinat ICP diambil dari data *point cloud* yang dihasilkan dari pemodelan rekonstruksi 3D untuk dijadikan bahan analisa menggunakan uji nilai korelasi pearson, *root mean square error* (RMSE) dan uji standar kesalahan. Nilai koordinat ICP sebagai berikut.

Tabel 4.4 Koordinat ICP Pemodelan Rekonstruksi 3D

Titik	Pemodelan Rekonstruksi 3D		
	<i>Easting (m)</i>	<i>Northing (m)</i>	<i>Z (m)</i>
ICP 1	683431,572	9127748,396	25,276
ICP 2	683438,307	9127751,344	25,292
ICP 3	683441,473	9127744,281	25,225
ICP 4	683434,704	9127741,341	25,299
ICP 5	683434,321	9127747,214	29,834
ICP 6	683437,641	9127748,321	29,826
ICP 7	683435,576	9127743,173	29,830
ICP 8	683439,468	9127745,652	29,849
ICP 9	683437,891	9127749,442	31,454
ICP 10	683433,456	9127747,271	31,444
ICP 11	683435,559	9127743,332	31,491
ICP 12	683439,363	9127745,498	31,492

4.2 Analisa

4.2.1 Kerangka Dasar

Analisa kerangka kontrol hasil pengukuran di lapangan ditinjau dari dua kriteria yaitu:

a. Kesalahan linier

Kesalahan linier pada umumnya mempunyai standar minimal yaitu 1:2500 atau 0.0004 (Supadiningsih, 2004). Apabila kesalahan linier yang dihasilkan kurang dari 1:2500 maka hasil pengukuran kerangka dasar dapat diterima.

b. Kesalahan penutup sudut

Kesalahan penutup sudut pada kerangka dasar ini mempunyai nilai sebesar 8" yang didapatkan dari persamaan kesalahan penutup sudut. Apabila kesalahan penutup sudut kerangka dasar setelah dikoreksi mempunyai nilai kurang dari 10" maka hasil pengukuran kerangka dasar dapat diterima.

c. Kesalahan penutup tinggi

Kesalahan penutup tinggi pada kerangka dasar ini mempunyai nilai sebesar 2 mm yang didapatkan dari persamaan kesalahan penutup tinggi yang memenuhi toleransi $8\sqrt{D}$ (km) ($8\sqrt{0.12888} = 2,872$ mm).

Analisa hasil kerangka dasar sebagai berikut.

Tabel 4.5 Kesalahan Kerangka Dasar

No.	Kriteria	Nilai
1	Kesalahan Linier	0.00021 m
2	Kesalahan Penutup Sudut	8"
3	Kesalahan Penutup Tinggi	2 mm

Berdasarkan hasil di atas, menunjukkan bahwa kerangka dasar dapat diterima untuk referensi pengukuran titik GCP dan ICP struktur Candi Singasari. Adapun tujuan pengukuran dan desain kerangka dasar yang memenuhi kriteria berpengaruh terhadap kualitas dan menjamin ketelitian hasil ukuran GCP dan ICO struktur Candi Singasari.

4.2.2 Kalibrasi Kamera

Fokus kamera mengalami perubahan sebesar 3,778175 mm, X_0 sebesar 3,269564 mm, dan Y_0 sebesar 1,1811622 mm. Pengolahan kalibrasi kamera menggunakan algoritma pengolahan *Bundle adjustment Self Calibration (BASC)* di MATLAB dan mempunyai kekurangan yaitu tidak tersedianya parameter untuk menilai bagus tidaknya hasil kalibrasi kamera, sehingga kualitas dari parameter IOP tidak bisa dianalisa dengan baik. Adapun parameter IOP yang diperoleh dari kalibrasi kamera ini dapat digunakan untuk meminimalisir distorsi radial dan tangensial pada *frame* video saat proses pemodelan rekonstruksi 3D bangunan Candi Singasari.

4.2.3 Bentuk Pemodelan Rekonstruksi 3D

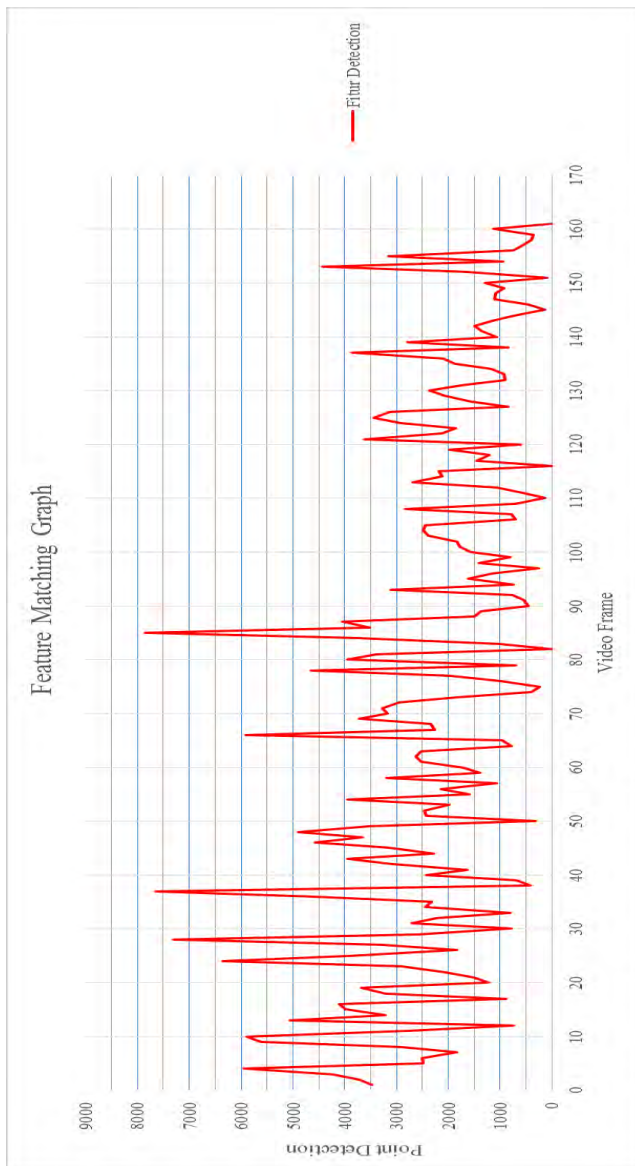
Pada proses *SfM* pemodelan rekonstruksi 3D menghasilkan bentuk 3D sebagai berikut.

Tabel 4.6 Hasil Model 3D

Hasil	Geometri
<i>Point Cloud</i>	308.248 <i>point</i>
<i>Dense Cloud</i>	1.126.457 <i>point</i>
<i>Textured</i>	225.291 <i>point</i> (permukaan/ <i>face</i>) dan 113.595 (<i>vertex</i>)

Proses *SfM* ini memanfaatkan algoritma SIFT yang bertujuan agar pemrosesan rekonstruksi 3D dapat berjalan dengan cepat, yaitu memanfaatkan *feature matching* pada setiap *frame* video, sehingga memerlukan overlap *frame* video yang rapat untuk memperoleh bentuk rekonstruksi 3D bangunan yang baik. Hasil utama dari pemodelan rekonstruksi 3D bangunan dapat dilihat dari geometri yang dihasilkan dalam bentuk *point cloud*, semakin rapat *point cloud* dari hasil pemrosesan *SfM* maka bentuk rekonstruksi 3D bangunan yang diperoleh semakin detail.

Adapun dari 161 frame video yang digunakan, rata-rata fitur terdeteksi untuk setiap frame video sejumlah 2.242 titik. Berikut grafik fitur yang terdeteksi untuk setiap frame video.



Gambar 4.10 Fitur Deteksi Frame Video

Berdasarkan dari hasil analisa di atas dan hasil model rekonstruksi 3D maka dapat dikatakan model rekonstruksi 3D Candi Singasari sudah memenuhi kriteria *Level of Detail* (LOD) orde 3. Adapun ketentuan kriteria tersebut mengacu pada syarat LOD orde 3. Sedangkan untuk nilai kesalahan pemodelan rekonstruksi 3D dapat dilihat pada tabel berikut.

Tabel 4.7 Nilai Kesalahan ICP

Titik	<i>Easting</i> (m)	<i>Northing</i> (m)	<i>Z</i> (m)
ICP 1	0,181	0,170	0,152
ICP 2	0,192	0,131	0,181
ICP 3	0,317	0,199	0,120
ICP 4	0,142	0,153	0,193
ICP 5	0,201	0,408	0,124
ICP 6	0,307	0,145	0,120
ICP 7	0,122	0,133	0,119
ICP 8	0,119	0,156	0,140
ICP 9	0,088	0,148	0,216
ICP 10	0,105	0,252	0,231
ICP 11	0,017	0,064	0,185
ICP 12	0,042	0,146	0,180

4.2.4 Koordinat ICP

Analisa koordinat ICP dilakukan untuk proses evaluasi hasil perhitungan nilai ketelitian geometrik koordinat ICP yang diperoleh dari ukuran langsung di lapangan dan dari hasil pemodelan rekonstruksi 3D Candi Singasari. Analisa koordinat ICP dilakukan dengan uji nilai korelasi person, *root*

mean square error (RMSE), uji standar kesalahan, dan analisa data secara kualitatif.

Berdasarkan hasil dari uji nilai korelasi diperoleh hasil perhitungan uji nilai korelasi adalah ICP koordinat *easting* sebesar 0,998, koordinat *northing* sebesar 0,997, dan koordinat Z sebesar 0,998. Hasil uji nilai korelasi ini menunjukkan bahwa ICP koordinat *easting* memiliki hubungan yang kuat (keterkaitan) begitu juga pada koordinat *northing*, dan Z.

Analisa untuk menyatakan akurasi suatu predisksi besaran menggunakan RMSE. Analisa RMSE dinyatakan dalam tabel berikut.

Tabel 4.8 Nilai RMSE ICP

Titik	<i>Easting</i> (m)	<i>Northing</i> (m)	Z (m)
ICP 1	0,181	0,170	0,152
ICP 2	0,192	0,131	0,181
ICP 3	0,317	0,199	0,120
ICP 4	0,142	0,153	0,193
ICP 5	0,201	0,408	0,124
ICP 6	0,307	0,145	0,120
ICP 7	0,122	0,133	0,119
ICP 8	0,119	0,156	0,140
ICP 9	0,088	0,148	0,216
ICP 10	0,105	0,252	0,231
ICP 11	0,017	0,064	0,185
ICP 12	0,042	0,146	0,180
RMSE	0,177	0,194	0,168

Nilai RMSE untuk koordinat *easting* 0,177 meter, koordinat *northing* 0,194 meter, dan koordinat *Z* 0,168 meter. Nilai RMSE ini memenuhi syarat untuk kelas akurasi LOD orde 3 yaitu kurang dari 0,5 meter.

Analisa untuk mengevaluasi nilai ICP hasil pemodelan 3D terhadap nilai ICP dari ukuran di lapangan yang diterima atau ditolak menggunakan uji standar kesalahan. Pada penelitian ini menggunakan tingkat kepercayaan 90%. Perhitungan nilai uji standar kesalahan sebagai berikut.

Tabel 4.9 Uji Standar Kesalahan

Titik	<i>Error Easting</i>	Keterangan	<i>Error Northing</i>	Keterangan	<i>Error Z</i>	Keterangan
ICP 01	0,181	Diterima	0,170	Diterima	0,152	Diterima
ICP 02	0,192	Diterima	0,131	Diterima	0,181	Diterima
ICP 03	0,317	Tidak Diterima	0,199	Diterima	0,120	Diterima
ICP 04	0,142	Diterima	0,153	Diterima	0,193	Diterima
ICP 05	0,201	Diterima	0,408	Tidak Diterima	0,124	Diterima
ICP 06	0,307	Tidak Diterima	0,145	Diterima	0,120	Diterima
ICP 07	0,122	Diterima	0,133	Diterima	0,119	Diterima
ICP 08	0,119	Diterima	0,156	Diterima	0,140	Diterima
ICP 09	0,088	Diterima	0,148	Diterima	0,216	Diterima
ICP 10	0,105	Diterima	0,252	Diterima	0,231	Tidak Diterima
ICP 11	0,017	Diterima	0,064	Diterima	0,185	Diterima
ICP 12	0,042	Diterima	0,146	Diterima	0,180	Diterima

Keterangan:

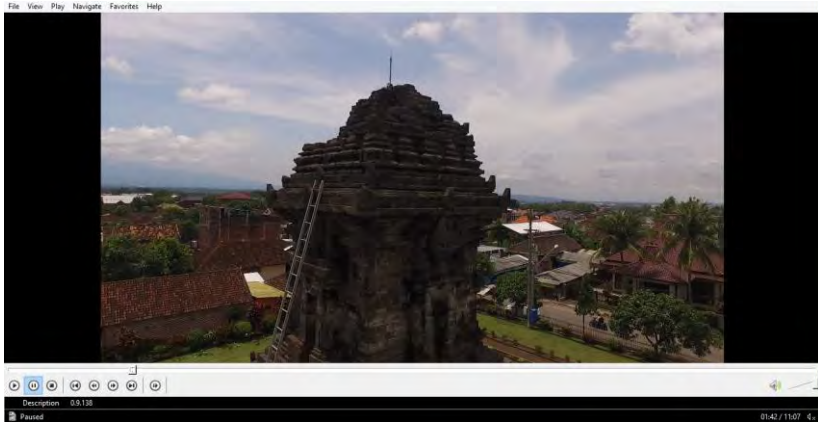
1. Interval kesalahan koordinat *easting*:
 $3,40 \times 10^{-5} < e < 3,05 \times 10^{-1}$ (dalam m),
2. Interval kesalahan koordinat *northing*:
 $3,50 \times 10^{-2} < e < 3,16 \times 10^{-1}$ (dalam m),
3. Interval kesalahan koordinat *Z*:
 $0,098 < e < 0,229$ (dalam m).

Analisa data secara kualitatif berdasarkan hasil uji standar kesalahan, sehingga diperoleh nilai *easting* diterima 83% (sangat baik), *northing* diterima 91,7% (sangat baik), dan *Z* diterima 91,7% (sangat baik).

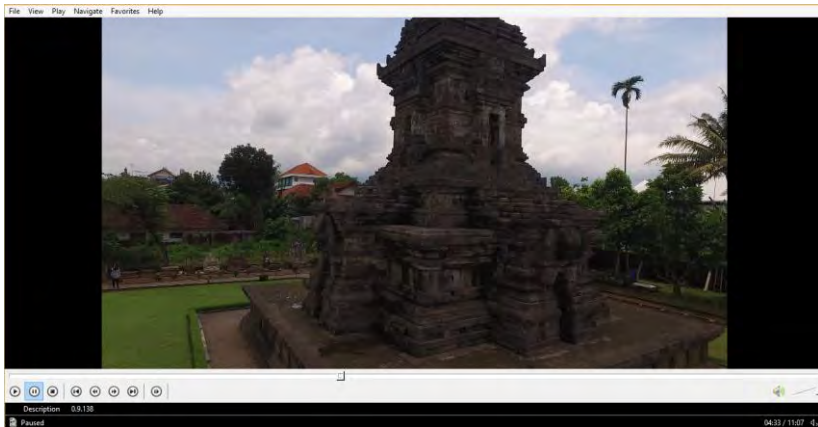
"HALAMAN INI SENGAJA DIKOSONGKAN"

LAMPIRAN 1

Perekaman Struktur Candi Singasari



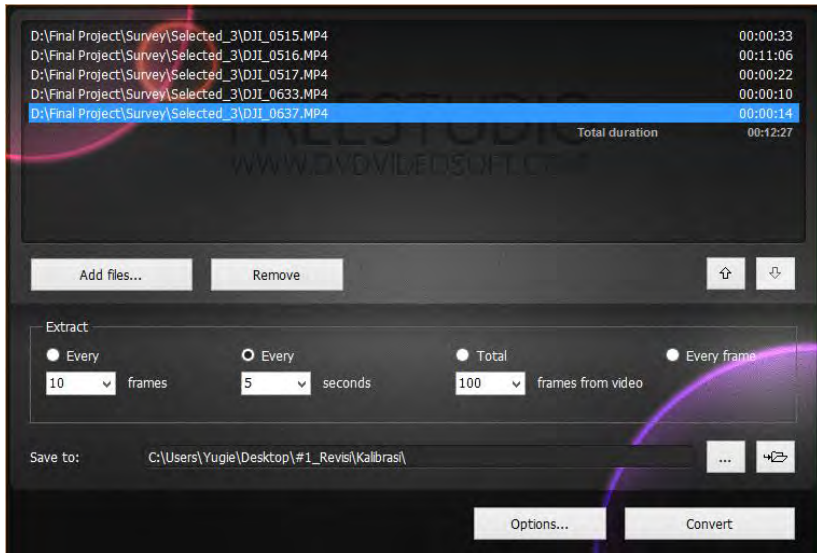
Gambar 6.1 Perekaman Struktur Candi Bagian Atas



Gambar 6.2 Perekaman Struktur Candi Bagian Tengah

LAMPIRAN 2

Pemotongan Frame Video



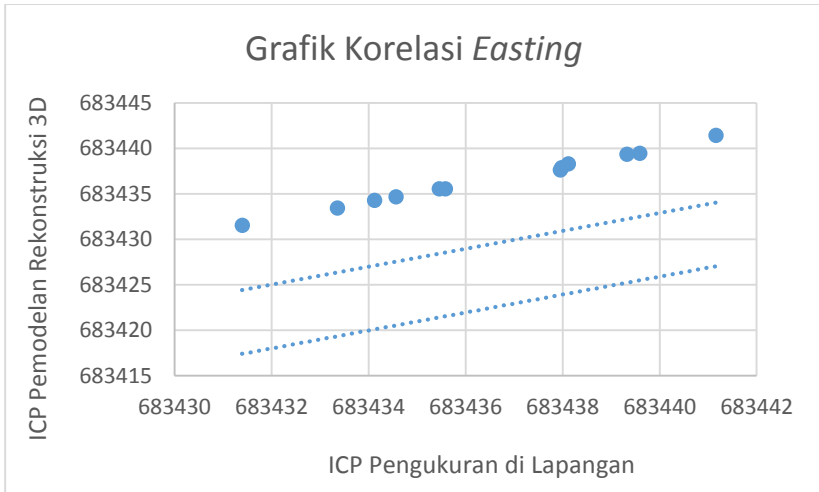
Gambar 6.2 Pemotongan Frame Video



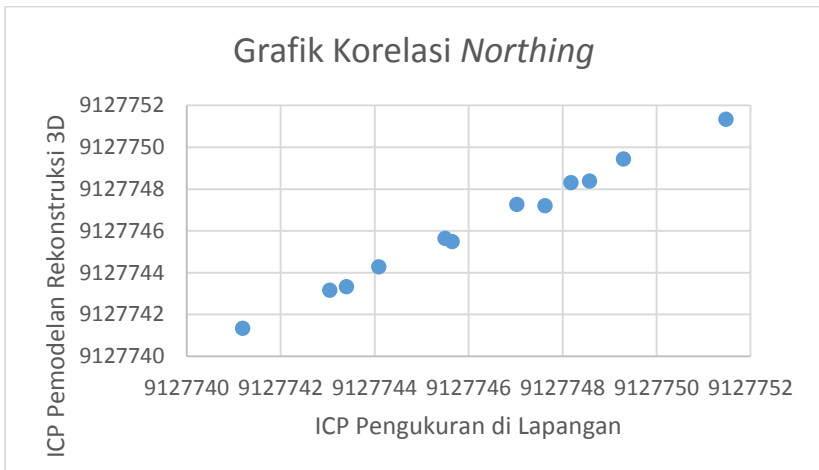
Gambar 6.3 Frame Video

LAMPIRAN 3

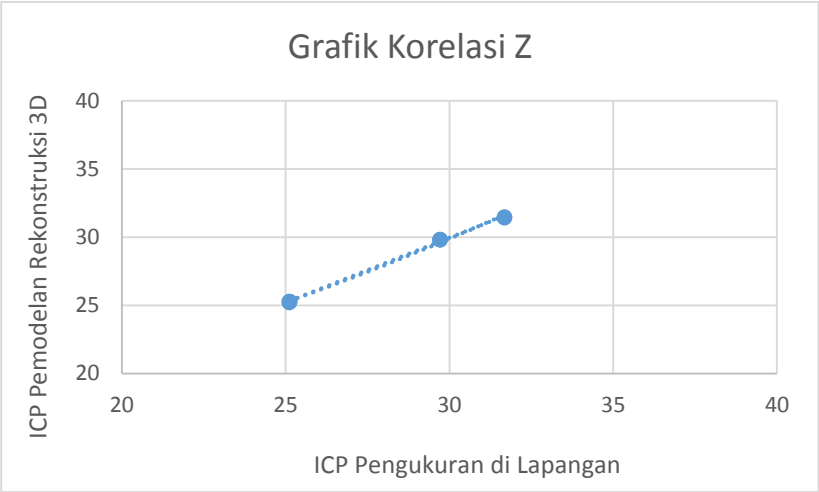
Grafik Korelasi ICP



Gambar 6.4 Grafik Korelasi *Easting*



Gambar 6.5 Grafik Korelasi *Northing*



Gambar 6.6 Grafik Korelasi Z

LAMPIRAN 4

Perhitungan Uji Standar Kesalahan

Tabel 6.1 Uji Standar Kesalahan

Titik	Pengukuran di Lapangan			Pemodelan Rekonstruksi 3D			Kesalahan			Standar Deviasi		
	<i>Easting</i> (m)	<i>Northing</i> (m)	<i>Z</i> (m)	<i>Easting</i> (m)	<i>Northing</i> (m)	<i>Z</i> (m)	<i>Easting</i> (m)	<i>Northing</i> (m)	<i>Z</i> (m)	<i>Easting</i> (m)	<i>Northing</i> (m)	<i>Z</i> (m)
ICP 1	683431.391	9127748.566	25.124	683431.572	9127748.396	25.276	0.181	0.170	0.152	0.093	0.085	0.0396
ICP 2	683438.115	9127751.475	25.111	683438.307	9127751.344	25.292	0.192	0.131	0.181	0.093	0.085	0.0396
ICP 3	683441.156	9127744.082	25.105	683441.473	9127744.281	25.225	0.317	0.199	0.120	0.093	0.085	0.0396
ICP 4	683434.562	9127741.188	25.106	683434.704	9127741.341	25.299	0.142	0.153	0.193	0.093	0.085	0.0396
ICP 5	683434.12	9127747.622	29.71	683434.321	9127747.214	29.834	0.201	0.408	0.124	0.093	0.085	0.0396
ICP 6	683437.948	9127748.176	29.706	683437.641	9127748.321	29.826	0.307	0.145	0.120	0.093	0.085	0.0396
ICP 7	683435.454	9127743.04	29.711	683435.576	9127743.173	29.83	0.122	0.133	0.119	0.093	0.085	0.0396
ICP 8	683439.587	9127745.496	29.709	683439.468	9127745.652	29.849	0.119	0.156	0.140	0.093	0.085	0.0396
ICP 9	683437.979	9127749.294	31.67	683437.891	9127749.442	31.454	0.088	0.148	0.216	0.093	0.085	0.0396
ICP 10	683433.351	9127747.019	31.675	683433.456	9127747.271	31.444	0.105	0.252	0.231	0.093	0.085	0.0396
ICP 11	683435.576	9127743.396	31.676	683435.559	9127743.332	31.491	0.017	0.064	0.185	0.093	0.085	0.0396
ICP 12	683439.321	9127745.644	31.672	683439.363	9127745.498	31.492	0.042	0.146	0.180	0.093	0.085	0.0396

Tabel 6.1 Lanjutan

Titik	Interval Kesalahan														
	E90					E90					E95				
	Minimum			Maksimum		Minimum			Maksimum		Minimum			Maksimum	
	<i>Easting</i> (m)	<i>Northing</i> (m)	<i>Z</i> (m)	<i>Easting</i> (m)	<i>Northing</i> (m)	<i>Z</i> (m)	<i>Easting</i> (m)	<i>Northing</i> (m)	<i>Z</i> (m)	<i>Easting</i> (m)	<i>Northing</i> (m)	<i>Z</i> (m)	<i>Easting</i> (m)	<i>Northing</i> (m)	<i>Z</i> (m)
ICP 1	0.090	0.118	0.137	0.215	0.233	0.229	3.44E-05	0.035	0.098	0.305	0.316	0.229	-0.029	0.008	0.086
ICP 2	0.090	0.118	0.137	0.215	0.233	0.229	3.44E-05	0.035	0.098	0.305	0.316	0.229	-0.029	0.008	0.086
ICP 3	0.090	0.118	0.137	0.215	0.233	0.229	3.44E-05	0.035	0.098	0.305	0.316	0.229	-0.029	0.008	0.086
ICP 4	0.090	0.118	0.137	0.215	0.233	0.229	3.44E-05	0.035	0.098	0.305	0.316	0.229	-0.029	0.008	0.086
ICP 5	0.090	0.118	0.137	0.215	0.233	0.229	3.44E-05	0.035	0.098	0.305	0.316	0.229	-0.029	0.008	0.086
ICP 6	0.090	0.118	0.137	0.215	0.233	0.229	3.44E-05	0.035	0.098	0.305	0.316	0.229	-0.029	0.008	0.086
ICP 7	0.090	0.118	0.137	0.215	0.233	0.229	3.44E-05	0.035	0.098	0.305	0.316	0.229	-0.029	0.008	0.086
ICP 8	0.090	0.118	0.137	0.215	0.233	0.229	3.44E-05	0.035	0.098	0.305	0.316	0.229	-0.029	0.008	0.086
ICP 9	0.090	0.118	0.137	0.215	0.233	0.229	3.44E-05	0.035	0.098	0.305	0.316	0.229	-0.029	0.008	0.086
ICP 10	0.090	0.118	0.137	0.215	0.233	0.229	3.44E-05	0.035	0.098	0.305	0.316	0.229	-0.029	0.008	0.086
ICP 11	0.090	0.118	0.137	0.215	0.233	0.229	3.44E-05	0.035	0.098	0.305	0.316	0.229	-0.029	0.008	0.086
ICP 12	0.090	0.118	0.137	0.215	0.233	0.229	3.44E-05	0.035	0.098	0.305	0.316	0.229	-0.029	0.008	0.086

Keterangan:

- Blok warna merah menunjukkan nilai ICP yang tidak diterima

LAMPIRAN 5

Surat Ijin Pengambilan Data



**KEMENTERIAN PENDIDIKAN DAN KEBUDAYAAN
BALAI PELESTARIAN CAGAR BUDAYA MOJOKERTO
WILAYAH KERJA PROPINSI JAWA TIMUR**

Jalan Majapahit No. 141 – 143 Trowulan, Kabupaten Mojokerto 61362

Telepon : (0321) 495515, Faksimil : (0321) 495515

Laman : purbakala.jatim@yahoo.com

SURAT IJIN PEMANFAATAN SITUS CAGAR BUDAYA

Nomor : 0339/CB7/KM/2016

Kepala Balai Pelestarian Cagar Budaya Mojokerto Wilayah Kerja Propinsi Jawa Timur
memberi ijin kepada :

Nama Mahasiswa : Yogie Nanda Pranata, NRP. 3512 100 067

Asal : Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Fakultas Teknik Sipil dan
Perencanaan, Jurusan Teknik Geomatika.

Memanfaatkan : Candi Singasari Jawa Timur

Keperluan : Ijin penelitian dengan judul "Evaluasi Metode Aerial Videogrametri
Untuk Rekonstruksi 3D Bangunan (Studi Kasus : Candi Singasari,
Jawa Timur)

Waktu : Bulan 15 Februari s/d 15 Mei 2016

Dengan persyaratan sebagai berikut :

1. Dalam kegiatan penelitian tersebut sekiranya dapat menyebabkan kerusakan terhadap situs maupun benda cagar budaya terlebih dahulu dikoordinasikan dengan Balai Pelestarian Cagar Budaya Mojokerto
2. Ikut menjaga kebersihan dan kelestarian lingkungan situs dan cagar budaya.
3. Kegiatan dilaksanakan pada pagi/siang hari/jam kerja kantor.
4. Selama Kegiatan didampingi oleh petugas dari Balai Pelestarian Cagar Budaya Mojokerto.
5. **Wajib menyerahkan 1 softcopy hasil kegiatan yang dilaksanakan**

Apabila di dalam pelaksanaan kegiatan yang Saudara lakukan ternyata terdapat penyimpangan dari persyaratan di atas, maka akan diberi sanksi sesuai dengan peraturan yang berlaku.

Demikian surat ijin ini diberikan agar dipergunakan sebagaimana mestinya



BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengolahan data atas, kesimpulan yang diambil yaitu:

1. Visualisasi rekonstruksi 3D struktur Candi Singasari menggunakan metode *aerial* videogrametri berhasil dilakukan. Hasil evaluasi rekonstruksi 3D struktur Candi Singasari menghasilkan bentuk *point cloud* sejumlah 308.248 titik, *dense cloud* sejumlah 1.126.457 titik, dan *textured* yang meliputi 225.291 titik (permukaan/face) dan 113.595 *vertex* dari 161 frame video dengan rata-rata fitur deteksi tiap frame video sejumlah 2.242 titik yang diolah menggunakan metode *structure from motion* (SfM). Bentuk visualisasi model 3D Candi Singasari sudah memenuhi syarat LOD orde 3 dengan kriteria $RMSE < 0,5$ meter, yaitu $RMSE\ easting$ sebesar 0,177 meter, $RMSE\ northing$ sebesar 0,194 meter, dan $RMSE\ Z$ sebesar 0,168 meter, efek visual eksterior representatif, dan visualisasi struktur Candi Singasari sesuai dengan objek sebenarnya.
2. Evaluasi untuk validasi nilai geometrik struktur Candi Singasari yang diperoleh dari hasil korelasi dan uji standar kesalahan. Hasil korelasi antara variabel ICP ukuran model rekonstruksi 3D terhadap ukuran di lapangan menunjukkan nilai korelasi untuk koordinat *easting* sebesar 0,998, koordinat *northing* sebesar 0,997 dan koordinat *Z* sebesar 0,998, artinya nilai korelasi tersebut menunjukkan hubungan keeratan yang kuat dari variabel - variabel tersebut. Adapun nilai uji standar kesalahan untuk koordinat *easting* diterima sebesar 83% (sangat baik), koordinat *northing* diterima sebesar 91, 7% (sangat baik), dan koordinat *Z* diterima sebesar 91,

7% (sangat baik).

5.2 Saran

Adapun saran untuk penelitian selanjutnya agar lebih baik dapat menggunakan prosedur sebagai berikut.

1. Kalibrasi kamera untuk menentukan parameter orientasi dalam kamera yang digunakan untuk meminimalkan distorsi radial dan tangensial pada frame video menggunakan konsep BASC. Kamera yang digunakan untuk proses perekaman minimal menggunakan spesifikasi kamera Sony EXMOR 1/2.3" Effective pixels: 12.4 M (total pixels: 12.76 M).
2. Orientasi relatif (*image matching*) untuk menentukan posisi relatif antar frame video menggunakan teknik SFM dan algoritma SIFT. Disarankan orientasi relatif dilakukan terhadap ± 150 frame video yang mempunyai kerapatan (overlap) tinggi sehingga pemrosesan (*image matching*) rekonstruksi 3D dapat berjalan lebih cepat. Teknik SFM dan algoritma SIFT bisa dilakukan terhadap *frame* video dengan resolusi minimal 2704 x 1520.
3. Orientasi absolut melalui *georeferencing* dari hasil koordinat ICP di lapangan terhadap bentuk visual 3D Candi Singasari untuk koreksi koordinat 3D (X, Y, Z). Sehingga, validasi dan kualitas koordinat 3D tersebut dapat dilakukan menggunakan uji standar kesalahan serta mengacu pada syarat dan ketentuan model 3D bangunan dengan spesifikasi minimal LOD 3.

DAFTAR PUSTAKA

- Abidin, H. Z., 2006. *Penentuan Posisi dengan GPS dan Aplikasinya*. Bandung: PT Pradnya Paramita.
- Arikunto, S., 2010. *Prosedur Penelitian Suatu Pendekatan Praktik*. Jakarta: PT. Rineka Cipta.
- Atkinson, K., 1996. *Close Range Photogrammetry and Machine Version*. Acotland: Whittles Publishing.
- Brilakis, I., Fathi, H. & Rashidi, A., 2011. Progressive 3D Reconstruction of Infrastructure with Videogrammetry. *Elsevier*, Volume 20, pp. 884-895.
- Esienbeiß, H., 2009. *UAV Photogrammetry*. Zurich: University of Technology Dresden.
- Fan, H. & Meng, L., 2009. *Automatic Derivation of Different Levels of Detail for 3d Buildings Modeled by City-Gml*, Munich: International Graduate School of Science and Engineering Department of Cartography, Technische Universität München Arcisstr.
- Featherstone, W. E. & Khun, M., 2006. *Height Systems and Vertical Datums*. s.l.:A Review In The Australian Context.
- Fraser, C. S., 1997. Digital Camera Self-Calibration. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 52(4), pp. 149-159.
- Fryer, J. G., 1989. Camera Calibration in Non Topographic Photogrammetry. *ASPRS*, pp. 59-69.
- Ghilani, C. D., 2010. *Adjustment Computation Spatial Data Analysis*. 5 ed. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc..
- Gruen, A., 1997. *Fundamentals of Videogrammetry*, Zurich: Institute Geodesy and Photogrammetry.

- Hanifa, N. R., 2007. *Studi Penggunaan Kamera Digital Low-Cost Non-Metric Auto-Focus untuk Pemantauan Deformasi*, Bandung: Program Studi Teknik Geodesi dan Geomatika ITB.
- Hidayatullah, S., 2012. *Pemanfaatan Videogrametri Dalam Penentuan Posisi Untuk Trajektori*, Bandung: Institut Teknologi Bandung.
- Leitch, K., 2002. *Close Range Photogrammetric Measurement of Bridge Deformation*. Mexico: New Mexico State University.
- Liu, X. et al., 2015. Videogrammetric Technique for Three-Dimensional Structural. *Elsevier*, Volume 63, pp. 87-99.
- Novak, K., 1992. *Rectification of Digital Imagery, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. s.l.:s.n.
- Nugraha, A., 2010. *Fotogrametri Digital*, Semarang: Universitas Diponegoro.
- Rahardian, P., 2008. Tipo-Morfologi Desain Arsitektur Candi di Jawa Kajian Arsitekturalnya terhadap Perkembangan Desain Sosok, Denah dan Peletakannya. *Kebhinnekaan Bentuk Arsitektur*.
- Rashidi, A., 2014. *Improved Monocular Videogrammetry for Generating 3D Dense Point Clouds of Built Infrastructure*. Georgia: Georgia Institute of Technology.
- Rashidi, A., Dai, F., Brilakis, I. & Vella, P., 2013. Optimized Selection of Key Frames for Monocular Videogrammetric Surveying of Civil Infrastructure. *Elsevier*, pp. 270-282.
- Sayekti, S. I., Amiuza, C. B. & Sujudwijono, N., 2014. Geometri Fraktal pada Candi Singosari sebagai Konsep Desain

Museum Purbakala Singosari. *Jurnal Mahasiswa Jurusan Teknik Arsitektur*, Volume 2.

Sugiyono, 2006. *Statistik untuk Penelitian*. Bandung: CV. Alfabeta.

Supadiningsih, C. N., 2004. *Modul Ajar Ilmu Ukur Tanah I*. Surabaya: Program Teknik Geodesi-ITS.

Tjahyadi, M. E., 2010. Pemantauan Deformasi Jalan Layang dan Jembatan Kereta Api dengan Kamera Dijital di Kota Malang. *Jurnal Soundir Program Studi Teknik Sipil Institut Teknologi Nasional Malang*.

Widiastuti, T., Supana & Panuwun, J., 2012. Keragaman Hayati Dalam Relief Candi Sebagai Bentuk Konservasi Lingkungan (Studi Kasus: Candi Penataran Kabupaten Blitar). *eprints.uns.ac.id*, pp. 1-14.

Wigrata, H., 1986. *alibrasi Besaran - Besaran Panjang Fokus dan Distorsi Lensa pada Kamera Non - Metrik*, Bandung: Departemen Teknik Geodesi ITB.

Wolf, P. R. & Dewitt, B. A., 2000. *Elements of Photogrammetry with Application in GIS*. New York AS: Mc Graw-Hill Book Company.

Yang, X., 2000. *Accuracy of Rational Function Approximation in Photogrammetry*. ASPRS Annual Conference, Washington D.C. .

"HALAMAN INI SENGAJA DIKOSONGKAN"

BIODATA PENULIS



Penulis dilahirkan di Blitar, Jawa Timur pada tanggal 21 Juli 1993. Penulis merupakan anak pertama dari tiga bersaudara. Pendidikan dasar penulis ditempuh di SDN Bendogerit 1 Kota Blitar (2000-2006), selanjutnya menempuh pendidikan menengah di SMPN 1 Kota Blitar (2006-2009), dan pendidikan menengah atas di SMAN 1 Kota Blitar (2009-2012). Pada tahun 2012, penulis melanjutkan pendidikan S1 di Teknik Geomatika, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya melalui jalur SNMPTN tulis. Selama menempuh pendidikan di bangku kuliah, penulis aktif dalam bidang akademik maupun non-akademik. Dalam bidang akademik penulis aktif membuat karya tulis ilmiah melalui Program Kreativitas Mahasiswa (PKM), khususnya di bidang fotogrametri. Karya PKM dan penelitian penulis antara lain: *“Pembuatan Peta Orthophoto Kawasan Robotika ITS dengan Memanfaatkan Wahana UAV”*, *“Pemanfaatan Peta Foto Udara untuk Prediksi Batas Terluar Pulau-Pulau Kecil (Studi Kasus: Pulau Gililabak, Madura)”*, *“Pembuatan Peta Foto Udara Desa Claket Kabupaten Mojokerto untuk Peta Dasar Skala 1:5000”*. Selain itu, pada tahun 2015 penulis dipercaya sebagai *trainer* keilmiahan ITS yang bertanggungjawab atas pelatihan seluruh mahasiswa ITS untuk karya-karya ilmiah yang inovatif dan aplikatif. Di bidang non-akademik penulis aktif dalam kegiatan organisasi mahasiswa (ormawa) yang tergabung dalam Himpunan Mahasiswa Geomatika (HIMAGE-ITS) sebagai staff (2013/2014) dan kepala departemen (2014 /2015) di Departemen Keilmiahan dan Keprofesian HIMAGE-ITS. Penulis mengambil tugas akhir sebagai syarat lulus S1 di bidang fotogrametri dengan judul *“Evaluasi Metode Aerial Videogrametri untuk Rekonstruksi 3D Bangunan (Studi Kasus: Candi Singasari, Jawa Timur)”*.